

O POTENCIAL VALOR DOS GÊMEOS DIGITAIS NA GESTÃO DE ATIVOS RODOFERROVIÁRIOS

João Vieira^{1,2}, Nuno Marques de Almeida¹, João Poças Martins³, Hugo Patrício² e João Gomes Morgado²

¹ CERIS, Instituto Superior Técnico; Universidade de Lisboa, Av. Rovisco Pais, 1049-001 Lisboa, Portugal
email: joao.cardoso.vieira@tecnico.ulisboa.pt

² Infraestruturas de Portugal, S.A., Praça da Portagem, 2809-013 Almada, Portugal

³ CONSTRUCT-GEQUALTEC – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Departamento de Engenharia Civil, Rua Dr. Roberto Frias, 4200-465 Porto, Portugal

Sumário

As crescentes exigências de sustentabilidade e resiliência no setor da mobilidade têm fomentado iniciativas de digitalização e aceleração da inovação na gestão de ativos de infraestruturas de transporte. Estas iniciativas apresentam um elevado potencial de geração de valor, quer para as organizações quer para as suas partes interessadas. As soluções tecnológicas frequentemente associadas à Indústria 4.0, em particular, os gémeos digitais (GD), têm recebido crescente interesse e uma progressiva adoção e desenvolvimento em domínios como a indústria ou o setor aeroespacial. Contudo, o conceito ainda não se encontra totalmente consolidado e isto constitui um entrave para a realização de todo o potencial valor do GD. Este artigo explora os impactes que a geminação digital dos ativos físicos das redes de transporte rodoferroviário tem nas práticas de gestão de ativos das organizações que gerem este tipo de infraestruturas.

Palavras-chave: Gémeo Digital; Digital Twin; Gestão de ativos; Ferrovia; Rodovia; Transformação digital

1 INTRODUÇÃO

Prevê-se que até 2030 o transporte de passageiros e de mercadorias aumente em cerca de 50% e 70%, respetivamente [1]. As redes rodoferroviárias, em particular, são responsáveis por mais de 60% do transporte de mercadorias e quase 90% do transporte de passageiros na União Europeia [2]. Para além de um cenário de procura crescente, estas redes enfrentam outros desafios igualmente relevantes, como o défice acumulado de investimento [3], o envelhecimento contínuo das infraestruturas [4], metas ambientais cada vez mais exigentes [1] e a necessidade de aumento da resiliência face a fenómenos extremos provocados pelas alterações climáticas.

Neste contexto, o investimento no aumento do conhecimento sobre as infraestruturas rodoferroviárias e em soluções de transformação digital constituem oportunidades de alto potencial de disrupção e de geração de valor, quer para as organizações quer para as suas partes interessadas. Apesar de este tipo de soluções se disseminar atualmente a um ritmo crescente [5,6], as organizações podem enfrentar dificuldades em perceber a viabilidade e os benefícios da sua incorporação nas atividades de gestão de ativos. Uma dessas soluções é o Gémeo Digital (GD), também conhecido como *Digital Twin*. À semelhança de outras abordagens que integram a denominada Indústria 4.0 (como a Inteligência Artificial, *Internet of Things* e *Big Data*), tem sido alvo de crescente interesse. Contudo, as organizações que o ponderam aplicar deparam-se com interpretações distintas sobre o conceito e expectativas variadas relativamente aos seus impactos potenciais. Este artigo procura assim contribuir para a identificação das oportunidades e desafios decorrentes da sua utilização e a sua adaptação ao contexto das infraestruturas rodoferroviárias, de forma a mitigar este entrave e a suportar futuramente o desenvolvimento de uma metodologia de apoio à decisão sobre oportunidades de investimento em GD para estas infraestruturas.

2 REVISÃO DE CONCEITOS

2.1 Valor no contexto das infraestruturas rodoferroviárias

O conceito de “valor” é inerente ao processo de tomada de decisão sobre a gestão de qualquer tipo de ativos. A NP ISO 55000:2016 [7] estabelece que o objetivo da gestão de ativos é perceber e produzir valor para a organização e respetivas partes interessadas, a partir dos ativos que esta gere e de acordo com os objetivos organizacionais. Dependendo de cada contexto organizacional e das perspetivas existentes, o valor percebido e produzido pode ser avaliado de diversas formas. O valor pode variar com o tempo, com as etapas do ciclo de vida dos ativos, com os objetivos específicos de cada parte envolvida e pode ainda ser tangível ou intangível, financeiro ou não financeiro [7]. Com o intuito de guiar os gestores de ativos na adoção do critério do valor para a tomada de decisão, a NP ISO 55000 [7] refere que a percepção e a produção do valor têm em vista o balanço dos custos, riscos, oportunidades e desempenho. Conforme discutido por Almeida *et al.* [8], são raros os estudos que abordam diretamente o tema do valor no processo de tomada de decisão em organizações gestoras de infraestruturas. Além disso, ainda não existe uma definição consensual para este conceito, bem como para as dimensões que o conceito de valor integra [8,9].

Ainda que para a conceção de uma metodologia de tomada de decisão baseada no valor seja necessária uma arquitetura mais desenvolvida, a Figura 1 estabelece os principais elementos e relações que o valor toma no contexto da tomada de decisão por organizações gestoras de ativos. Seguindo a interpretação da NP ISO 55000:2016 [7] e considerando o valor como um balanço entre o custo, os riscos, as oportunidades e o desempenho, é crucial estabelecer à partida os denominados *value drivers*, isto é, as expressões das necessidades e expectativas relativas às diferentes partes envolvidas. Os *value drivers*, tal como o conceito do valor, diferem consoante as perspetivas das partes interessadas e o modelo de negócio da organização [8].

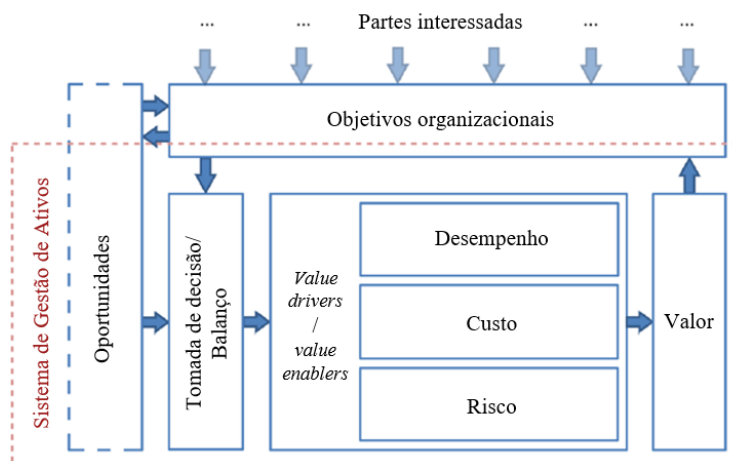


Fig.1. Modelo conceitual para a tomada de decisão baseada no valor (adaptado de [10])

No contexto das infraestruturas rodoferroviárias, os desafios associados à discussão do valor são exponenciados. Não só o portefólio de ativos é tipicamente diverso e disperso, assim como também são as partes interessadas (e respetivas necessidades e expectativas) e os modelos de negócio envolvidos [11]. As organizações gestoras deste tipo de infraestruturas podem ser ou não proprietárias dos ativos que gerem, podem operar ou não esses ativos, e podem existir diversas entidades com diferentes expectativas a explorar a mesma infraestrutura. Este conjunto de circunstâncias faz com que a desconstrução do conceito do valor para a incorporação na tomada de decisão sobre gestão de ativos rodoferroviários seja um desafio fundamental, ainda que complexo.

2.2 Gémeo Digital

No âmbito da revolução tecnológica associada à Indústria 4.0, uma das abordagens que tem reunido interesse crescente é a do Gémeo Digital (GD) [5,6,12-15]. Embora o GD e outras abordagens tecnológicas associadas existam há algumas décadas (como a Inteligência Artificial, *Internet of Things* e *Big Data*), a redução do custo e do aumento da capacidade tecnológica (como os sensores, a capacidade de computação e de armazenamento) contribuíram para aumentar a acessibilidade e os ganhos marginais provenientes da sua utilização [12,16-18].

Embora o seu conceito ainda não esteja estabilizado [12,19], entende-se no contexto deste artigo que um GD é uma representação digital de um ativo ou sistema de ativos físicos e do seu ambiente operacional, integrando uma conexão de dados em tempo-real com o ativo ou sistema de ativos físicos, bem como outras ferramentas e fontes de suporte (tais como modelos físicos, análise de dados, simulação e capacidades preditivas), usados para gerar percepções alinhadas com um propósito pré-definido e, em última análise, para superar obstáculos e promover processos de tomada de decisão robustas em matéria de gestão de ativos [20].

À semelhança do proposto por Grieves e Vickers [21], considera-se que um GD é constituído por 3 partes: a dimensão física (associada aos ativos físicos existentes e sobre os quais são extraídos dados e tomadas decisões), a dimensão digital (que agrega, armazena, trata e analisa os dados provenientes dos ativos físicos, gerando percepções de suporte à tomada de decisão) e os fluxos de dados existentes entre as dimensões física e digital (que asseguram o processamento e a transmissão em tempo real dos sinais provenientes dos sensores e/ou da dimensão digital). A Figura 2 e o Quadro 1, construídos a partir dos contributos de [22-25], ilustram essa estrutura sob a forma de uma arquitetura conceptual do GD e descrevem as várias fases que compõem o seu ciclo de ação.

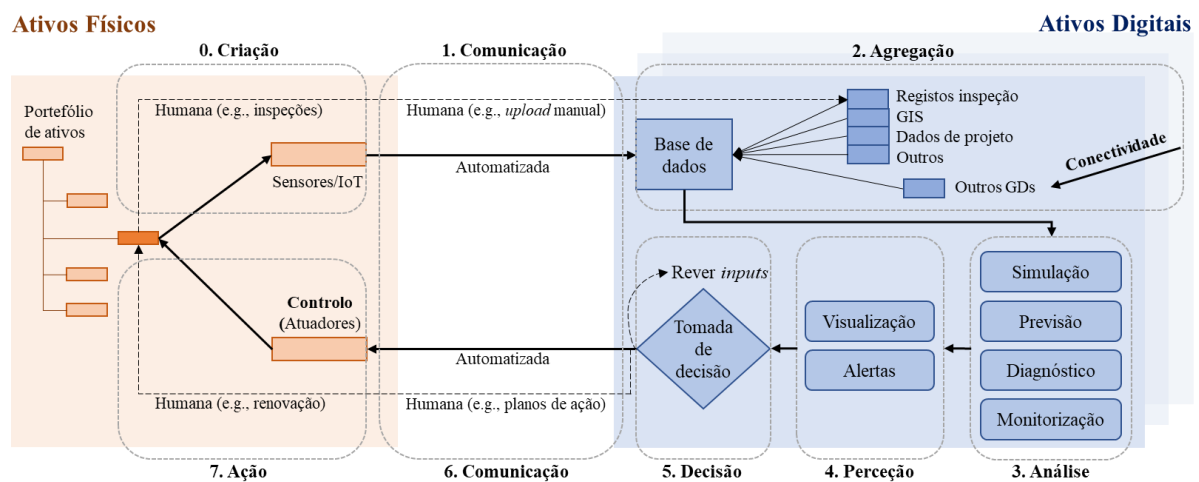


Fig.2. Arquitetura conceptual do Gémeo Digital

De uma forma geral, a arquitetura proposta para o GD divide-se em 7 componentes: criação, comunicação, agregação, análise, percepção, decisão e ação. Deve registar-se que esta arquitetura constitui a estrutura-tipo de um GD, podendo sofrer alterações consoante o contexto e o propósito de cada GD. Por exemplo, no caso de um GD criado para a fase de planeamento e conceção de um ativo físico, pelo facto de o último ainda não possuir materialidade física, as fases de criação e comunicação/integração do GD podem ser omitidas e a ação/tomada de decisão passa a ter consequências unicamente ao nível do ativo digital (e.g., revisão de modelos, cenários, dados de entrada). O Quadro 1 descreve resumidamente cada um dos componentes da arquitetura proposta e descreve brevemente a sua contribuição para o funcionamento do GD.

Quadro 1. Fases do ciclo de ação do GD

Fase	Descrição
Criação	São medidos ou aferidos dados sobre parâmetros de desempenho do ativo físico (caudal, frequência, extensão, voltagem, etc.) e sobre o ambiente em que este opera (temperatura, precipitação, humidade, pressão, etc.), através de medições manuais ou de sensores incorporados ou instalados no respetivo ativo. Os sensores geram sinais que podem ser transformados em mensagens seguras através de <i>encoders</i> , para posterior transmissão ao ativo digital.
Comunicação	Esta fase procura assegurar a transmissão e a integração dos dados entre os domínios físico e digital. Nesta fase podem ser incorporadas diferentes soluções tecnológicas para efetuar a transmissão segura, eficiente e em tempo real dos dados, tais como o <i>edge processing</i> , interfaces de comunicação (IoT – wi-fi, 4G/5G, <i>Ethernet</i> , Satélite, etc.) e <i>edge security</i> (<i>firewalls</i> , chaves de encriptação, certificados de dispositivos, etc.). Certos dados podem ser ainda comunicados de forma manual, por exemplo no seguimento de inspeções. No sentido do ativo digital para o ativo físico, esta fase é responsável pela codificação das decisões tomadas e o respetivo envio através de sinais aos atuadores dos ativos físicos em causa.
Agregação	Os dados provenientes dos sensores são agregados a outros dados detidos pela organização e integrados no Sistema de Registos. Podem ser incluídos dados de projeto, listas de materiais, informação geográfica, dados de fornecedores, registos de inspeção, dados de sistemas empresariais (<i>Enterprise Resource Planning</i> , <i>Enterprise Asset Management</i>) ou até dados de outros GDs. Esta fase suporta a ingestão de dados para um repositório (<i>data lake</i>), que é posteriormente processado e preparado para a fase de análise.
Análise	Os dados são analisados recorrendo a analítica avançada e modelos iterativos (rotinas e simulações algorítmicas), gerando perceções e recomendações para a tomada de decisão. A simulação compreende o uso de modelos preditivos multivariados, simulações estocásticas e determinísticas, funções, etc. A inclusão de metodologias de Inteligência Artificial permite efetuar diagnósticos, análises descritivas e preditivas, otimizações, reconhecimento de padrões, entre outros.
Perceção	As perceções geradas a partir da análise de dados podem ser apresentadas de diversas formas. A visualização pode recorrer a representações visuais com um grau de detalhe variável, mas compatíveis com a interpretação da informação a apresentar. A apresentação pode refletir-se em representações geométricas, esquemáticas, modelos 3D, 4D, Realidade Virtual, Realidade Aumentada, informação geográfica, <i>dashboards</i> de visualização em tempo real, sistema de alertas, entre outros.
Decisão	As perceções geradas a partir do GD alimentam o processo de tomada de decisão associado à gestão dos ativos físicos. A decisão deve refletir sobre os cenários analisados pelo GD e sobre os critérios de tomada de decisão existentes, podendo existir ainda restrições físicas, orçamentais, temporais, entre outras. A decisão pode ainda recair sobre a revisão dos dados de entrada (sensores com funcionamento deficiente, modelos físicos desajustados, etc.) de forma a melhorar a informação de suporte à decisão.
Ação	As ações geradas a partir da tomada de decisão podem incluir o controlo dos ativos físicos (processos de decisão descentralizados, recorrendo a atuadores), a atualização dos seus sistemas de <i>back-end</i> ou ainda alterações de carácter mais indireto e com maior participação humana, tais como a criação de planos de ação (com identificação dos tipos de ação, prioridades, recursos necessários, entre outros).

O GD tem registado um crescente número de aplicações nos mais variados domínios, em particular na indústria e no setor aeroespacial, tendo chegado recentemente ao setor das infraestruturas civis [12], que é tradicionalmente menos proativo em relação à transformação digital [16]. Na literatura existente sobre o GD existem várias referências, tipicamente de carácter qualitativo, que realçam o valor que o GD pode gerar para as organizações [26-33]. Além disso, o facto de existirem soluções comerciais de software a adotarem uma interpretação sobre o GD distinta da proposta pela maioria da comunidade científica tem contribuído para aumentar a confusão existente em torno deste conceito [34]. Essa ambiguidade pode contribuir para o aumento da latência original deste setor relativamente à adoção de medidas de transformação digital, em particular através do GD. Outro dos entraves existentes prende-se com a escassez de exemplos práticos de GDs no âmbito dos ativos construídos [6].

Torna-se necessário, portanto, entender que custos, riscos, oportunidades e benefícios de desempenho podem advir da aplicação do GD em organizações gestoras de ativos rodoferroviários, de forma a suportar decisões de priorização de investimentos em soluções desta natureza.

3 METODOLOGIA

Para identificar os impactos que o GD pode gerar, propõe-se um mapeamento dos mesmos através de uma revisão da literatura. A revisão apoia-se nas referências obtidas a partir de uma anterior revisão sistemática da literatura sobre o GD no contexto rodoferroviário [20] e em outras fontes de informação, como artigos científicos de congressos, páginas *web*, relatórios/*white papers* e normas ISO, permitindo ainda um alargamento do âmbito a outros setores (indústria, petróleo e gás, construção, etc.). O conjunto de referências inclui 67 fontes de informação, compostas por 1 Norma ISO, 16 relatórios/*white papers*, 22 páginas *web* e 28 artigos científicos/teses.

Conforme apresentado no capítulo anterior, o GD possui vários elementos que lhe permitem gerar valor para a organização a partir da gestão e da valorização dos dados e informação provenientes dos ativos físicos e dos ativos digitais. O Quadro 2 apresenta a proposta dos autores para a classificação das capacidades do GD, que é adotada na aplicação da metodologia. Ainda que existam várias propostas distintas para essa classificação, os autores propõem uma classificação baseada nos contributos agregados de algumas referências [22-25] e na arquitetura apresentada na Figura 2.

Quadro 2. Capacidades do GD e correspondência com as fases do seu ciclo de ação

Capacidades	Descrição	Fases correspondentes						
		Criação	Comunicação	Agregação	Análise	Perceção	Decisão	Ação
Integração e colaboração	Transmissão, integração e agregação de vários tipos de dados e colaboração entre partes	X	X	X				
Conectividade	Conectividade entre GDs, permitindo partilha de dados entre ativos e sistemas de ativos			X				
Monitorização	Monitorização e diagnóstico em tempo real, complementados com sistemas de alerta				X			
Simulação e modelação	Representação do comportamento dos ativos em simulações e modelação de cenários				X			
Analítica e previsão	Capacidade de análise de dados, deteção de padrões, otimização e criação de previsões				X			
Visualização	Visualização através de representações digitais					X		
Controlo	Controlo dos ativos						X	X

Definidas as capacidades do GD, propõe-se que a classificação dos impactos do GD seja dividida em dois tipos: impactos positivos (oportunidades) e desafios (riscos). Além disso, para diferenciar as partes afetadas, dividem-se em 3 níveis de impactes (conforme a estrutura conceitual do valor definida por [8]):

- gestão do ciclo de vida dos ativos físicos;
- organização;
- partes interessadas.

A classificação dos impactos do GD ao nível da gestão do ciclo de vida dos ativos físicos, da organização e das partes interessadas segue as dimensões enunciadas no Quadro 3. As dimensões presentes no Quadro 3 foram adaptadas a partir das propostas de alguns estudos sobre o valor e de documentos de referência em matéria de gestão de ativos [8,35-38]. A metodologia de identificação toma como dados de entrada as várias descrições textuais obtidas a partir das referências bibliográficas, sendo assinalada (ou não) a existência de menção a impactos (impactos positivos ou desafios) nos vários níveis de análise (capacidades, gestão do ciclo de vida dos ativos físicos, organização e partes interessadas) e respetivas dimensões.

Quadro 3. Dimensões de impacto do GD

Impactos	Descrição
Gestão do ciclo de vida dos ativos físicos	<i>Compliance</i> dos ativos
	Cumprimento legal e regulamentar relativo aos ativos
	Planeamento e Aquisição
	Redução de erros, custo ou prazos nas fases de planeamento, conceção, criação, aquisição ou comissionamento dos ativos
	Operações
	Aumento ou otimização do desempenho operacional
	Manutenção
	Melhoria da manutenção, através de um melhor planeamento, otimização das inspeções e ações preventivas, antecipação das necessidades e diminuição da duração das intervenções
	Resposta a falhas
	Redução da frequência de falhas e incidentes, bem como do tempo de resposta
Organização	Fim de vida
	Otimização do descomissionamento e abate dos ativos, através de um melhor planeamento e identificação da melhor estratégia para a sua execução
	Recursos
	Melhoria no aprovisionamento e gestão de recursos (matérias-primas, peças sobresselentes, energia, recursos humanos, etc.)
	Gestão dos riscos e oportunidades
	Melhoria da gestão dos riscos e oportunidades, através de uma melhor identificação e resposta aos mesmos (e.g., tratamento dos riscos)
	Rastreabilidade dos dados
	Melhoria na capacidade de manter e rastrear os dados em qualquer e sobre qualquer fase do ciclo de vida dos ativos
	Cooperação e eficiência dos processos internos
	Aumento da cooperação, coordenação, transparência, acesso e partilha interna de informação, aumentando a eficiência dos processos internos
Partes interessadas	Segurança
	Aumento da segurança, redução do número e gravidade dos acidentes
	Nível de Serviço/Qualidade
	Aumento do nível de serviço (qualidade do serviço prestado)
	Disponibilidade da infraestrutura
	Redução da indisponibilidade da infraestrutura
	Formação de recursos humanos
	Melhoria da formação e treino dos recursos humanos
	Confiança e qualidade da decisão
	Aumento da confiança e da qualidade da informação e das decisões tomadas
	Redução OPEX
	Redução dos gastos operacionais (OPEX)
	Redução CAPEX
	Redução dos gastos de capital (CAPEX)
	<i>Compliance</i> organizacional
	Cumprimento com os requisitos legais e regulamentares inerentes à atividade da organização
	Impacto ambiental
	Redução do impacto ambiental da organização
	Satisfação clientes e trabalhadores
	Melhoria da satisfação dos clientes e trabalhadores
	Sustentabilidade
	Aumento da sustentabilidade da organização e das partes interessadas
	Custos reduzidos
	Diminuição dos custos do serviço
	Informação e participação
	Aumento da informação disponível, da transparência e da participação das partes interessadas nas decisões da organização
	Rentabilidade
	Aumento da rentabilidade da organização
	Segurança no serviço
	Aumento da segurança associada ao serviço prestado
	Disponibilidade do serviço
	Aumento da disponibilidade do serviço
	Nível de serviço
	Aumento do nível do serviço prestado
	<i>Compliance</i>
	Aumento do cumprimento contratual, regulamentar e legal
	Sustentabilidade
	Aumento da sustentabilidade da organização e das partes interessadas

Em primeiro lugar, observa-se que existe uma distribuição equilibrada dos contributos (519) entre as referências bibliográficas consideradas, com exceção das Normas ISO que, face ao número reduzido de publicações existentes sobre este tema e ao seu intuito particular, têm uma contribuição inferior nesta análise quantitativa (<2%).

Em segundo lugar, verifica-se que, dentro do conjunto de capacidades do GD aqui consideradas, a analítica e previsão (30%), a simulação e modelação (23%), e a monitorização (21%) são as características do GD com maior fluxo de contributos positivos (74% do total de 505 contributos) para a gestão do ciclo de vida dos ativos físicos. Num segundo plano, e com menor número de contributos, encontram-se a integração e colaboração (12%), a visualização (7%), a conectividade (4%) e o controlo (3%). Nota-se ainda que no conjunto de referências consideradas não existe uma preponderância de contributos para uma dada capacidade do GD.

No plano da gestão do ciclo de vida dos ativos físicos, podem-se identificar 3 grupos de atividades com dimensões distintas relativamente ao número total de contributos identificados (594). Em primeiro lugar, destaca-se a fase das operações enquanto atividade do ciclo de vida com maior preponderância, com cerca de 38% dos contributos indetificados – sensivelmente o dobro relativamente à segunda maior atividade (manutenção). Num segundo grupo, a manutenção (21%), o planeamento e aquisição (17%) e a resposta a falhas (13%) apresentam um número considerável de contributos (total de 51%). Por último, num terceiro grupo e com menor número de contributos, incluem-se a gestão dos riscos e oportunidades (4%), os recursos (4%), o fim de vida (2%), o *compliance* dos ativos (1%) e a rastreabilidade dos ativos (<1%). Através de uma análise mais detalhada, percebe-se que a fase de operações possui contributos de origem bastante diversa relativamente às capacidades do GD que os originam, ao invés das atividades de planeamento e aquisição, que possuem contributos significativos provenientes da capacidade de simulação e modelação. Relativamente à manutenção, identifica-se um forte contributo das capacidades de analítica e previsão para produzir impactos positivos nesta atividade.

No que diz respeito aos impactos na organização, verifica-se que os contributos identificados são em menor número (366) relativamente aos que afluem às atividades do ciclo de vida dos ativos (594), o que pode indiciar que os impactos neste âmbito não são tão evidentes quanto os anteriores. Verifica-se ainda que existe uma distribuição equilibrada dos impactos. O mais significativo refere-se ao aumento da confiança e da qualidade da decisão (19%), seguido da redução do OPEX (14%), do aumento da disponibilidade da infraestrutura (13%), do aumento da cooperação e da eficiência dos processos internos (12%), do aumento da segurança (12%) e do nível de serviço/qualidade (10%). Os impactos com menos contributos referem-se à formação de recursos humanos (4%), à satisfação dos clientes e trabalhadores (2%) e ao *compliance* organizacional (1%). Consta-se ainda que o impacto relativo ao aumento da confiança e da qualidade de decisão possui contributos significativos a partir da fase de operações, sucedendo-se o mesmo entre a disponibilidade da infraestrutura e a resposta a falhas.

Por último, observa-se que o número de contributos com referências a impactos nas partes interessadas (112) é substancialmente inferior aos contextos anteriores, o que pode estar relacionado com uma ainda maior falta de evidência existente relativamente ao impacto positivo do GD a esse nível. Ainda assim, destacam-se neste nível impactos ao nível da sustentabilidade (25%), custos reduzidos (20%) e disponibilidade do serviço (16%).

A Figura 4, por outro lado, apresenta os desafios identificados no contexto organizacional.

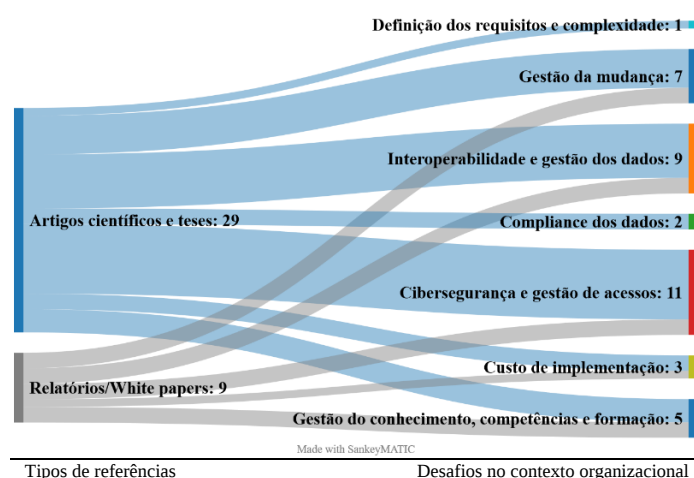


Fig.4. Desafios do GD no contexto organizacional

Numa primeira análise, percebe-se que o número global de contributos que identificam riscos ou desafios na utilização do GD (38) é significativamente inferior em relação ao cenário de impactos positivos (519). Dessa forma, e porque também estes desafios são descritos pelas referências de uma forma mais genérica que os anteriores, os autores apresentam-nos numa única dimensão denominada “contexto organizacional”.

Em segundo lugar, verifica-se que existem apenas contributos provenientes de artigos científicos, teses e relatórios/*white papers*, o que significa que não foram identificados desafios ou riscos do GD a partir das páginas *web* consultadas ou do documento normativo consultado. Dos 38 contributos identificados, 76% provêm de artigos científicos e teses e 24% de relatórios/*white papers*. Examinando os impactos no contexto organizacional, constata-se que os impactos mais significativos referem-se à cibersegurança e gestão de acessos (29%), à interoperabilidade e gestão dos dados (24%) e à gestão da mudança (18%). Os impactos com menor representação dizem respeito ao custo de implementação (8%), ao *compliance* dos dados (5%) e à definição dos requisitos e complexidade (3%).

4.2 Discussão sobre o contexto rodoferroviário

Transpondo os principais impactos anteriormente identificados para o contexto rodoferroviário, é possível identificar algumas atividades de gestão de ativos com potencial considerável para a utilização do GD.

Uma das fases com maior número de contributos sobre impactos positivos é a de planeamento e criação. Esta fase, correspondente ao período inicial do ciclo de vida dos ativos, apresenta um forte contributo da capacidade de simulação e modelação. No contexto rodoferroviário, esta fase abrange todas as atividades planeamento, conceção, construção e comissionamento dos ativos físicos. A capacidade de efetuar simulações para diferentes cenários operacionais (e.g., procura) permite aos decisores tomar decisões (e.g., dimensionamento da infraestrutura) com base na melhor informação disponível [39,40]. Outro impacto relevante é a otimização da conceção dos ativos físicos e a redução do tempo de comissionamento. No caso de ativos físicos que necessitam de protótipos físicos (e.g., sistema inteligente de monitorização em passagens de nível), o GD pode explorar os dados provenientes da sensorização do protótipo para validar ou rever os pressupostos de projeto e otimizar a configuração do ativo físico que será futuramente instalado. O GD possui também a capacidade de reduzir prazos e diminuir custos na fase de criação dos ativos, nomeadamente através da integração da informação proveniente de diferentes fontes, de uma melhor colaboração entre as partes envolvidas e uma deteção antecipada de erros e não-conformidades. No contexto rodoferroviário estes contributos têm especial interesse uma vez que as empreitadas de construção deste tipo de infraestruturas podem apresentar desvios de prazos e erros de planeamento, conceção e construção [12].

Na fase de utilização, os contributos do GD para as infraestruturas rodoviárias e ferroviárias são igualmente relevantes. Na fase de operações, a utilização do GD permite, através das capacidades de monitorização, analítica e previsão, otimizar o desempenho dos ativos tendo em conta os objetivos definidos. Por exemplo, a gestão dos horários de exploração da rede ferroviária apresenta-se como um desafio complexo e para o qual o GD possui a capacidade de contribuir positivamente. A capacidade de simulação e otimização permite ao GD antecipar estrangulamentos operacionais, identificar perfis de risco ao longo das rotas e planear as mesmas de forma a cumprir com as exigências de pontualidade [27,40,41]. O GD possui também a capacidade de melhorar a resposta a falhas ou incidentes, identificando situações não conformes (e.g., incêndio florestal) de forma célere, prevendo o seu impacto na operação da rede (e.g., atrasos na circulação) e emitindo alertas para os gestores e/ou utilizadores (e.g., em painéis informativos). O GD apresenta o potencial de aumentar a segurança na utilização da infraestrutura, quer para os utilizadores quer para a organização. A identificação célere de incidentes (e.g., falha funcional em passagem de nível) ou de situações de perigo acrescido na utilização da infraestrutura (e.g., eventos climáticos extremos) podem contribuir para diminuir o risco de acidentes durante a utilização da infraestrutura e, assim, aumentar a sua segurança [42]. A simulação e a visualização no GD permitem ainda às equipas de operação executarem, de forma virtual, simulacros e exercícios de resposta em caso de acidentes ou falhas da infraestrutura (e.g., incêndios em túneis), aumentando a prontidão, a sua segurança e a sua disponibilidade.

Quanto à manutenção das infraestruturas rodoferroviárias, o GD apresenta contributos significativos, em particular a partir das suas capacidades analíticas e de previsão. O GD contribui de forma relevante para a manutenção preditiva [42,43]. A constante monitorização do estado de condição e operação dos ativos, juntamente com a análise do histórico de condição de ativos similares (e.g., registos de inspeção, histórico de falhas, desempenho), permite avaliar o risco de falha dos ativos [40], reduzir as ações de manutenção corretiva (e os custos associados) e otimizar o planeamento da manutenção, por via da manutenção preditiva e pela calendarização otimizada das inspeções. Este impacto do GD na manutenção contribui também para a diminuição do número de falhas da infraestrutura, reduzindo assim os impactos gerados nos seus utilizadores (e.g., atrasos, danos materiais).

Por outro lado, a implementação do GD no contexto rodoferroviário poderá resultar em alguns riscos ou desafios. A cibersegurança na gestão de infraestruturas críticas, como a rodovia ou a ferrovia, apresenta-se como um aspeto fulcral [44]. A possibilidade de perda de informação ou do controlo de ativos para uma entidade externa (e.g., aparelhos de mudança de via, passagem de nível, sinalização) pode resultar em graves consequências materiais e humanas. A proteção dos dados e a gestão dos acessos apresentam-se como atividades essenciais, para as quais deverão ser alocados os recursos necessários para cumprirem os requisitos de segurança. Outro dos desafios existentes prende-se com a interoperabilidade e a gestão dos dados [44]. A integração de dados de diferentes fontes ao longo do ciclo de vida dos ativos (e.g., dados de projeto, operacionais, ambientais, etc.) pode originar problemas de compatibilidade e de gestão desses dados, o que exige atenção por parte da organização [41]. Outro dos desafios com peso relevante é a gestão da mudança, principalmente em organizações gestoras de infraestruturas que apresentem níveis de maturidade reduzidos relativamente à transformação digital. A perceção do que é o GD e de que forma pode impactar as atividades da organização, em particular as que podem ser complementadas ou substituídas pelo seu uso, são desafios que deverão ser abordados e esclarecidos para garantir o uso eficaz deste tipo de soluções e a maximização do valor gerado a partir da gestão dos ativos.

5 CONCLUSÕES

O Gémeo Digital apresenta-se como uma abordagem tecnológica disruptiva com perspetivas de geração de valor a partir dos dados relativos aos ativos físicos geridos pelas organizações. O presente estudo mostra que a partir da literatura existente é possível identificar impactos positivos do uso do GD, em particular na gestão do ciclo de vida dos ativos físicos e no contexto organizacional. As principais características do GD que os originam são a capacidade de simulação e modelação, analítica e previsão, e monitorização. Essas características geram impactos relevantes nas fases de operações dos ativos, planeamento e aquisição, manutenção e resposta a incidentes ou falhas. Estes impactos geram resultados diversos dentro da organização, desde efeitos mais diretos, como a redução do OPEX e CAPEX e o aumento da disponibilidade da infraestrutura, a mais indiretos, como o aumento da confiança e qualidade das decisões e o aumento da cooperação e da eficiência dos processos internos. No contexto das infraestruturas rodoferroviárias, esses impactos podem traduzir-se em benefícios variados, como a otimização no nível de serviço prestado, o aumento da disponibilidade da infraestrutura, melhoria na criação de novas infraestruturas rodoferroviárias, aumento da segurança na organização e no serviço prestado, e maior capacidade de predição nas operações e manutenção dessas infraestruturas. Identificam-se também, ainda que em menor número, riscos ou desafios provenientes da aplicação do GD neste tipo de organizações, como a cibersegurança e a gestão de acessos, a interoperabilidade e gestão de dados e a gestão da mudança. Estes desafios são especialmente pertinentes no contexto das infraestruturas rodoferroviárias, uma vez que se trata de um setor tipicamente menos reativo à transformação digital, que gere variadas classes de ativos e com grande dispersão geográfica, e cujas infraestruturas desempenham uma função crítica para a sociedade, com impactos significativos a nível económico, social e ambiental. A identificação dos impactos potenciais aqui demonstrados é essencial para suportar o desenvolvimento futuro de metodologias de apoio à tomada de decisão, com base no conceito do valor, e cuja decisão incida sobre investimentos de transformação digital, como é o caso do GD.

6 AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi financiado por: Financiamento Base - UIDB/04708/2020 da Unidade de Investigação CONSTRUCT - Instituto de I&D em Estruturas e Construções - financiada por fundos nacionais através da FCT/MCTES (PIDDAC); Infraestruturas de Portugal, S.A. e pelo programa Shift2Rail JU/H2020, financiado pelo contrato n.º 101012456 (IN2TRACK-3). Os autores agradecem ainda o apoio da Fundação para a Ciência e Tecnologia através do financiamento UIDB/04625/2020 da Unidade de Investigação CERIS.

7 REFERÊNCIAS

1. SuM4All, *Global Mobility Report – Tracking Sector Performance*. Sustainable Mobility for All, 2017. ISBN: 978-0-692-95670-0.
2. EU, *Statistical Pocketbook 2020 – EU transport in figures*, European Union, 2020. <https://data.europa.eu/doi/10.2832/919583>

3. OECD, *Transport Bridging Divides*, OECD Urban Studies, OECD Publishing, Paris, 2020. doi: [10.1787/55ae1fd8-en](https://doi.org/10.1787/55ae1fd8-en)
4. OECD. OECD Regional Outlook 2019: *Leveraging Megatrends for Cities and Rural Areas*, OECD Publishing, Paris, 2019, doi: [10.1787/9789264312838-en](https://doi.org/10.1787/9789264312838-en)
5. F. Tao, H. Zhang, A. Liu, A.Y.C. Nee, Digital Twin in Industry: State-of-the-Art, *IEEE Trans. Industr. Inform.*, 15(4), pp. 2405-2415, 2019. doi: [10.1109/TII.2018.2873186](https://doi.org/10.1109/TII.2018.2873186)
6. K. Lamb, *Principle-based digital twins: a scoping review*, Centre for Digital Built Britain, 2019. doi: [10.17863/CAM.47094](https://doi.org/10.17863/CAM.47094)
7. NP ISO 55000:2016, *Gestão de ativos – Visão geral, princípios e terminologia*, 2016.
8. N. Almeida, M. Trindade, D. Komljenovic, M. Finger, A conceptual construct on value for infrastructure asset management, *Utilities Policy*, 75, 101354, 2022. doi: [10.1016/j.jup.2022.101354](https://doi.org/10.1016/j.jup.2022.101354)
9. K.C. Ang, C.P. Killen, S. Sankaran, Value constructs in multi-stakeholder environments that influence project portfolio decision making. *Proceedings of EURAM 2015, the 15th Annual Conference of the European Academy of Management*, Warsaw Poland, June 17-20, 2015.
10. GFMAM, *The value of AM to an organization*, Global Forum on Maintenance & Asset Management, 2016. ISBN 0-9870602-6-0
11. H. Patrício, N. Almeida, A framework for evaluating the performance of infrastructure assets. Application to the life-cycle of road and railway bridges, *Life-cycle of engineering systems*, CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Raton, pp 1743–1748, 2016.
12. M. Callcut, J.-P. Cerceau Agliozzo, L. Varga, L. McMillan, Digital Twins in Civil Infrastructure Systems. *Sustainability*, 13(20), 11549, 2021. doi: [10.3390/su132011549](https://doi.org/10.3390/su132011549)
13. D. Jones, C. Snider, A. Nassehi, J. Yon, B. Hicks, Characterising the Digital Twin: A systematic literature review. *CIRP J. Manuf. Sci. Technol.*, 29, Part A, pp. 36-52, 2020. doi: [10.1016/j.cirpj.2020.02.002](https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2020.02.002)
14. K.Y.H. Lim, P. Zheng, C.-H. Chen, A state-of-the-art survey of Digital Twin: techniques, engineering product lifecycle management and business innovation perspectives. *J. Intell. Manuf.*, 31, pp. 1313-1337, 2021. doi: [10.1007/s10845-019-01512-w](https://doi.org/10.1007/s10845-019-01512-w)
15. J.C. Camposano, K. Smolander, T. Ruippo, Seven Metaphors to Understand Digital Twins of Built Assets. *IEEE Access*, 9, pp. 27167-27181, 2021. doi: [10.1109/ACCESS.2021.3058009](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3058009)
16. M.V. Chester, B.R. Allenby, Perspective: The Cyber Frontier and Infrastructure, *IEEE Access*, 8, pp. 28301-28310, 2020. doi: [10.1109/ACCESS.2020.2971960](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2971960)
17. J. Lopez, J. E. Rubio, C. Alcaraz, Digital Twins for Intelligent Authorization in the B5G-Enabled Smart Grid. *IEEE Wirel. Commun.*, 28(2), pp. 48-55, 2021. doi: [10.1109/MWC.001.2000336](https://doi.org/10.1109/MWC.001.2000336)
18. O.E. Marai, T. Taleb, J. Song, Roads Infrastructure Digital Twin: A Step Toward Smarter Cities Realization. *IEEE Netw.*, 35(2), pp. 136-143, 2021. doi: [10.1109/MNET.011.2000398](https://doi.org/10.1109/MNET.011.2000398)
19. W. Kritzing, M. Karner, G. Traar, J. Henjes, W. Sihn, Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification. *IFAC-PapersOnLine*, 51(11), pp.1016–1022, 2018. doi: [10.1016/j.ifacol.2018.08.474](https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.474)
20. J. Vieira, J.P. Martins, N.M. Almeida, H. Patrício, J.G. Morgado, Digital transformation for resilient and sustainable rail and road networks: A systematic literature review on digital twins, 2022 (in press).
21. M. Grieves, J. Vickers, Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems, *Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems*, 1st ed.; Kahlen, F.-J.; Flumerfelt, S.; Alves, A.; Springer, Cham., pp. 85-113, 2017. doi: [10.1007/978-3-319-38756-7_4](https://doi.org/10.1007/978-3-319-38756-7_4)
22. K. Harper, S. Malakuti, C. Ganz, *Digital Twin Architecture and Standards*, Industrial Internet Consortium Journal of Innovation, 2019.

23. A. Stanford-Clark, E. Frank-Schultz, M. Harris, *What are digital twins?*, IBM, 2019. <https://developer.ibm.com/articles/what-are-digital-twins/> (acedido em 25/02/2022).
24. A. Parrot, L. Warshaw, *Industry 4.0 and the digital twin - Manufacturing meets its match*, Deloitte, 2017.
25. ARUP, *Digital twin – Towards a meaningful framework*, ARUP, 2019.
26. CDBB, *Digital Twin Toolkit - Developing the business case for your digital twin*. CDBB, 2021.
27. RSSB, *How a Digital Twins Collaboration Improved Timetables for Greater Anglia*, 2019. <https://www.rssb.co.uk/what-we-do/insights-and-news/blogs/how-greater-anglia-and-toshiba-have-used-digital-twins-to-improve-timetabling> (acedido em 06/04/2022)
28. S. Boschert, T. Coughlin, M. Ferraris, F. Flammini, et al., *Symbiotic Autonomous Systems White Paper III*, IEEE Symbiotic Autonomous Systems (SAS) Initiative, 2019.
29. Autodesk, *Three ways digital twin is poised to benefit project delivery*, 2021. https://damassets.autodesk.net/content/dam/autodesk/www/campaigns/digital-twin/adk-21105_ebook_exec_summary_v2.pdf (acedido em 06/04/2022)
30. GE, *Digital Twins are mission critical*, 2020. <https://www.ge.com/digital/applications/digital-twin> (acedido em 06/04/2020).
31. Anylogic, *An introduction to Digital Twin development*, The Anylogic Company, 2018.
32. Unife, *Rail fit for digital age*, UNIFE Vision Paper on Digitalisation, Second Chapter, The European Rail Supply Industry Association, 2020.
33. Lanner, *Industry 4.0: Demystifying Digital Twins*, Lanner, 2018.
34. R. Lu, I. K. Brilakis, Digital twinning of existing reinforced concrete bridges from labelled point clusters. *Autom. Constr.*, 105, 102837, 2019. doi: [10.1016/J.AUTCON.2019.102837](https://doi.org/10.1016/J.AUTCON.2019.102837)
35. H. Patrício, N. Almeida, A Common Risk Framework for Road and Rail Infrastructures, *14th WCEAM Proceedings*, Crespo Márquez, A., Komljenovic, D., Amadi-Echendu, J. (eds). Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham, 2019. doi: [10.1007/978-3-030-64228-0_11](https://doi.org/10.1007/978-3-030-64228-0_11)
36. M. Trindade, N. Almeida, M. Finger, J.G. Silva, L. Ghira, J. Vieira, *Application of a value-based decision-making process to an industrial water supply system*, Engineering Assets and Public Infrastructures in the Age of Digitalization. Lecture Notes in Mechanical Engineering, Liyanage, J., Amadi-Echendu, J., Mathew, J. (eds). Springer, Cha, 2020. doi: [10.1007/978-3-030-48021-9_36](https://doi.org/10.1007/978-3-030-48021-9_36)
37. IAM, *Asset Management - An Anatomy*, The Institute of Asset Management, Version 3, 2015.
38. IPWEA, *International Infrastructure Management Manual*, Institute of Public Works Engineering Australasia, 2015. ISBN 0-473-10685-X.
39. S. Callet, *Using Digital twins for complex mass transit system design and integration*, UIC Digital Days. https://uic.org/events/IMG/pdf/2_scallet_sncf_uic_conference_2019-digital_twin_uic_v2.pdf (acedido em 19/04/2022).
40. L. Feuvrier, H. Beringer, *The 3DEXPERIENCE platform to foster Innovation in Mobility*, UIC Digital Days. https://uic.org/events/IMG/pdf/1_uic_digital_days_dassault_systemes_3dexperience_digital_twin.pdf (acedido em 19/04/2022).
41. N. Attoh-Okine, Big data challenges in railway engineering, *2014 IEEE International Conference on Big Data*, pp. 7-9, 2014. doi: [10.1109/BigData.2014.7004424](https://doi.org/10.1109/BigData.2014.7004424)
42. D. Pascual, P. Daponte, U. Kumar, Handbook of Industry 4.0 and SMART Systems, *Handbook of Industry 4.0 and SMART Systems* (1st ed.), CRC Press, 2019. doi: [10.1201/9780429455759](https://doi.org/10.1201/9780429455759)
43. PIARC, *Innovative Approaches to Asset Management*, Technical Committee D.1 Asset Management. World Road Association, 2019.
44. PIARC, *Big Data for Road Network Operations*, Technical Committee B.1 Road Network Operations/Its. World Road Association, 2019.