

MESTRADO

MULTIMÉDIA - ESPECIALIZAÇÃO EM TECNOLOGIAS INTERATIVAS E JOGOS
DIGITAIS

O Conceito de Digital Twin como Ferramenta de Apoio à Operação de Veículos Ferroviários

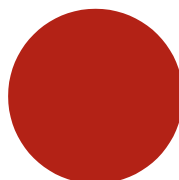
Lucas José Souza da Rocha

M

2022

FACULDADES PARTICIPANTES:

**FACULDADE DE ENGENHARIA
FACULDADE DE BELAS ARTES
FACULDADE DE CIÊNCIAS
FACULDADE DE ECONOMIA
FACULDADE DE LETRAS**





O Conceito de Digital Twin como Ferramenta de Apoio à Operação de Veículos Ferroviários

Lucas José Souza da Rocha

Mestrado em Multimédia da Universidade do Porto

Orientador: Gil Manuel Gonçalves (PhD)

Fevereiro de 2022

© Lucas José Souza da Rocha, 2022

O Conceito de Digital Twin como Ferramenta de Apoio à Operação de Veículos Ferroviários

Lucas José Souza da Rocha

Mestrado em Multimédia da Universidade do Porto

Aprovado em provas públicas pelo Júri:

Presidente: Alexandre Valle de Carvalho

Vogal Externo: Pedro Torres

Orientador: Gil Manuel Gonçalves

Resumo

Os serviços ferroviários vêm despontando como uma das principais opções de transporte sustentável, em especial nas áreas metropolitanas. Contudo, estes serviços são significativamente dependentes de altos investimentos e de uma logística complexa, o que cria a necessidade de identificação de oportunidades de minimização do desperdício de recursos para que estes serviços mantenham-se acessíveis e competitivos.

O *digital twin*, um dos conceitos centrais do paradigma da Indústria 4.0, possibilita a monitoração detalhada e em tempo real do estado de um equipamento durante o seu funcionamento. Por conta disto, o *digital twin* representa um importante apoio na garantia de uma tomada de decisão sólida.

Levando isto em consideração, este trabalho – desenvolvido no âmbito do projeto de investigação Ferrovia 4.0 e cofinanciado pelo COMPETE 2020, Portugal 2020, Lisboa 2020 e pelos Fundos Europeus Estruturais e de Investimento da União Europeia - busca explorar o potencial do conceito de *digital twin* para apoio à operação de veículos ferroviários.

Primeiramente, fez-se uma investigação acerca das aplicações e estudos do conceito de *digital twin* realizados nos anos recentes. Em seguida, foi desenvolvido um protótipo de *digital twin* de um modelo de comboio genérico. Este protótipo é composto por uma base de dados relacional para o armazenamento dos dados relacionados às condições das diferentes componentes do veículo, um servidor *web* para conexão à base de dados, e uma aplicação móvel que funciona como uma *dashboard* do *digital twin*.

Com o protótipo desenvolvido, foi possível vislumbrar como o conceito de *digital twin* proporciona um conhecimento mais aprofundado das condições de funcionamento de componentes de um veículo ferroviário, além de suportar a manutenção preventiva através da análise da evolução histórica dos dados coletados destas componentes. Os resultados deste estudo permitem também identificar possíveis aprimoramentos e oportunidades de investigação para trabalhos futuros.

Palavras-chave: transportes ferroviários, *digital twin*, monitoração, Indústria 4.0

Abstract

Rail services are emerging as a major sustainable transportation option, especially in metropolitan areas. However, these services are significantly dependent on high investments and complex logistics, which creates the need to identify opportunities to minimize the waste of resources so that these services remain affordable and competitive.

The digital twin, one of the core concepts of the Industry 4.0 paradigm, enables detailed, real-time monitoring of the state of a piece of equipment during its operation. Because of this, the digital twin represents an important support in ensuring sound decision making.

Taking this into consideration, this work - developed within the scope of the Ferrovia 4.0 research project and co-funded by COMPETE 2020, Portugal 2020, Lisboa 2020, and the European Union's European Structural and Investment Funds - seeks to explore the potential of the digital twin to support the operation of rail vehicles.

First, an investigation was conducted about the applications and studies of the digital twin concept carried out in recent years. Next, a digital twin prototype of a generic train model was developed. This prototype is composed of a relational database for storing the data about the conditions of the different components of the vehicle, a web server for connecting to the database, and a mobile application that works as a dashboard of the digital twin.

With the developed prototype, it was possible to glimpse how the digital twin concept provides a deeper knowledge of the working conditions of the components of a train. Besides, the prototype also supports preventive maintenance through the analysis of the historical evolution of the data collected from these components. The results of this study also allow the identification of possible improvements and research opportunities for future work.

Keywords: rail transport, digital twin, monitoring, Industry 4.0

Agradecimentos

Agradeço ao Professor Gil Gonçalves pela inestimável ajuda e pela atenção dispensada a mim ao longo do desenvolvimento deste trabalho.

Aos meus pais, por sempre estarem ao meu lado nos momentos que mais precisei e por todos os sacrifícios que tiveram que fazer para que eu pudesse chegar até onde estou agora.

À toda minha família pelo apoio e carinho de sempre.

Aos meus grandes amigos Lucas Jorge, Paulo Victor e Rodrigo, por estarem comigo há tantos anos e por todos os momentos que passamos juntos.

E, finalmente, à todos os professores com os quais tive contacto ao longo do curso, por todo o aprendizado e crescimento pessoal e profissional que proporcionaram-me.

Lucas José Souza da Rocha

Índice

1. Introdução.....	1
1.1 Contextualização.....	1
1.2 Motivação e Contribuições	2
1.3 Questões de Investigação e Objetivos.....	2
1.4 Estrutura do Trabalho	3
2. Revisão Bibliográfica	5
2.1 Introdução e Difusão do Conceito de <i>Digital Twin</i>	5
2.2 Estudos e Aplicações de <i>Digital Twins</i>	7
2.2.1 Estágio de Design	7
2.2.2 Estágio de Fabricação	9
2.2.3 Estágio de Distribuição.....	11
2.2.4 Estágio de Utilização	12
2.2.5 Estágio de Declínio (<i>End-of-Life</i>).....	14
2.3 Tecnologias-Chave para a Implementação de <i>Digital Twins</i>	14
2.3.1 Comunicação	15
2.3.2 Representação de Dados	18
2.3.3 Computação de Dados	19
2.3.4 Microsserviços.....	21
2.4 Conclusões	23
3. Metodologia e Definição de Requisitos	24
3.1 O Conceito de <i>Digital Twin</i>	24
3.2 Métodos de Investigação	25
3.3 Requisitos Funcionais	26
3.4 Definição das Componentes e Variáveis	27
3.5 Revisão Tecnológica.....	27
3.5.1 <i>Engine</i> de Desenvolvimento de Software.....	28
3.5.2 Sistema de Gerenciamento de Base de Dados Relacional	29
3.5.3 Software de Servidor <i>Web</i>	30

3.5.4 Solução para Isolamento da Base de Dados e Servidor <i>Web</i>	30
4. Implementação	32
4.1 Arquitetura do Protótipo de <i>Digital Twin</i>	32
4.2 Base de Dados e Servidor <i>Web</i>	33
4.3 Aplicação de Visualização dos <i>Digital Twins</i>	34
5. Validação.....	38
5.1 Elaboração do Inquérito.....	38
5.2 Resultados.....	39
6. Conclusões e Trabalhos Futuros	42
7. Referências.....	44
8. Apêndices	48
8.1 Apêndice 1: Inquérito de Avaliação de Qualidade do Protótipo de <i>Digital Twin</i>	48

Lista de Figuras

Figura 1: Estágios do Processo de PLM	5
Figura 2: Quantidade anual aproximada de publicações científicas relacionadas a <i>Digital Twin</i>	6
Figura 3: Ferramentas e metodologias necessárias para a criação de um <i>Digital Twin</i>	15
Figura 4: Conceito de <i>Digital Twin</i>	25
Figura 5: Diagrama de casos de uso da aplicação móvel do protótipo de <i>Digital Twin</i>	26
Figura 6: Arquitetura do Protótipo de <i>Digital Twin</i>	33
Figura 7: Modelo de dados do protótipo de <i>Digital Twin</i>	34
Figura 8: <i>Mockup</i> da interface gráfica da aplicação móvel	35
Figura 9: Interface gráfica final da aplicação móvel	37
Figura 10: Janela de visualização do gráfico de evolução histórica da variável	37

Lista de Tabelas

Tabela 1: Questões de Investigação e Objetivos	3
Tabela 2: Arquiteturas de comunicação mais utilizadas para a criação de <i>Digital Twins</i>	16
Tabela 3: Protocolos de troca de dados mais utilizados para a criação de <i>Digital Twins</i>	17
Tabela 4: Plataformas middleware mais utilizadas para a criação de <i>Digital Twins</i>	18
Tabela 5: Ferramentas de representação de dados mais utilizadas para a criação de <i>Digital Twins</i>	19
Tabela 6: Formatos de dados mais utilizados para a criação de <i>Digital Twins</i>	19
Tabela 7: Ferramentas de processamento computacional mais utilizadas para a criação de <i>Digital Twins</i>	20
Tabela 8: Metodologias de análise de dados mais utilizadas para a criação de <i>Digital Twins</i>	21
Tabela 9: Ferramentas de virtualização mais utilizadas para a criação de <i>Digital Twins</i>	22
Tabela 10: Ferramentas de simulação mais utilizadas para a criação de <i>Digital Twins</i>	22
Tabela 11: Ferramentas de validação mais utilizadas para a criação de <i>Digital Twins</i>	23
Tabela 12: Componentes e variáveis definidas para o escopo do protótipo de <i>Digital Twin</i>	27
Tabela 13: Respostas referentes aos itens 1 a 5 do inquérito	39
Tabela 14: Respostas referentes ao campo de feedback do inquérito	40

Abreviaturas e Símbolos

AGV	Automated Guided Vehicle
AR	Augmented Reality (Realidade Aumentada)
IoT	Internet of Things
PLM	Product Lifecycle Management
VR	Virtual Reality (Realidade Virtual)

1. Introdução

1.1 Contextualização

O acelerado avanço tecnológico e científico observado nos últimos séculos viabilizou a evolução da industrialização em todo o planeta (Liao et al., 2017). Este fenômeno teve início com a Primeira Revolução Industrial, no final do século 18, a qual introduziu instalações de manufatura mecânica movidas à água e à vapor, além de equipamentos como o tear mecânico. Passado um século, a Segunda Revolução Industrial, iniciada no final do século 19, foi marcada pela difusão de fábricas de produção em massa movidas à eletricidade, juntamente com a introdução da divisão do trabalho. No começo da década de 1970, teve-se início a Terceira Revolução Industrial, a qual caracterizou-se pela aplicação de eletrônicos e da tecnologia da informação (IT) para alcançar um nível ainda maior de automação nos processos de fabricação (Henning et al., 2013). O surgimento das tecnologias de IoT (*Internet of Things*) vêm ocasionando uma nova mudança de paradigma industrial, a qual foi denominada Indústria 4.0 (Shrouf et al., 2014).

A transição de sistemas centralizados de controle industrial para sistemas inteligentes descentralizados pode ser considerada o princípio essencial por trás do paradigma da Indústria 4.0. A coleta e partilha de dados, em tempo real, entre produtos, componentes e máquinas industriais permite que os sistemas de produção industrial possam adaptar seu comportamento à diferentes condições de operação (Shrouf et al., 2014).

Uma das principais tecnologias do paradigma da Indústria 4.0 é o conceito de *digital twin*. Este conceito permite integrar o mundo físico ao mundo virtual por meio da criação de um representação virtual completa de um equipamento ou objeto. Com isto, um *digital twin* viabiliza a construção de sistemas de informação que ofereçam bases mais sólidas para a tomada de decisão (Qi et al., 2021). Por esta razão, este conceito vêm sendo empregado não apenas no contexto da produção industrial, mas também em setores como planejamento urbano e saúde (Lim et al., 2020).

O conceito de *digital twin* também mostra-se promissor para propósitos de aprimoramento e modernização dos processos de transporte ferroviário. Por tratarem-se de operações significativamente dependentes de altos investimentos e de uma logística complexa, é desejável otimizar os custos relacionados à manutenção e modernização dos equipamentos, assim como

minimizar o tempo de inatividade das operações. O conceito de *digital twin* pode representar uma forma de enfrentar estes desafios, pois possibilita a monitoração e avaliação do estado do material circulante (Jeschke & Grassmann, 2021).

Com isto em mente, este trabalho de dissertação busca explorar o potencial do conceito de *digital twin* para suporte às operações de transporte ferroviário, em especial no que tange à monitoração das condições dos veículos ferroviários e à implementação de processos de manutenção preditiva. Para isto, foi desenvolvido um protótipo de *digital twin* de um modelo de comboio genérico, o qual consiste em uma base de dados, um servidor *web* e uma aplicação móvel para visualização dos dados.

O presente trabalho foi elaborado no âmbito do projeto de investigação Ferrovia 4.0 - cofinanciado pelo COMPETE 2020, Portugal 2020, Lisboa 2020 e pelos Fundos Europeus Estruturais e de Investimento da União Europeia – e foi acompanhado por parceiros do projeto ao longo de todo o processo de desenvolvimento.

1.2 Motivação e Contribuições

Por possibilitar o transporte de uma grande quantidade de passageiros e cargas pesadas a longas distâncias, o setor dos transportes ferroviário representa um serviço crucial para o cenário logístico e económico de um país, além de ser o meio de transporte mais importante a manutenção de uma economia sustentável (Projeto Ferrovia 4.0, 2019).

Levando em consideração o agravamento da crise climática – para qual a saturação do sistema rodoviário contribui de forma significativa - mostra-se necessário aumentar a competitividade e atratividade dos serviços de transporte ferroviário, de forma que estes mantenham-se como uma das formas de transporte mais eficientes dos pontos de vista ambiental e energético. Por este motivo, a Comissão Europeia tem recomendado fortemente o estímulo ao aumento da quota dos transportes ferroviários face aos rodoviários (Projeto Ferrovia 4.0, 2019).

Estas foram as razões que motivaram o presente trabalho de dissertação, cuja principal contribuição consiste no desenvolvimento de uma abordagem que auxilia na implementação de práticas orientadas ao aumento da confiabilidade dos serviços ferroviários e à minimização do desperdício dos recursos usados nestes serviços. Ademais, este trabalho também serve como ponto de partida para a elaboração de soluções baseadas no paradigma da Indústria 4.0 que visam o aumento da competitividade e sustentabilidade dos transportes ferroviários.

1.3 Questões de Investigação e Objetivos

As questões de investigação formuladas, assim como os objetivos identificados para este trabalho são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1: Questões de Investigação e Objetivos

#	Questão de Investigação	Objetivo
QI1	De que maneira a aplicação do conceito de <i>digital twin</i> pode promover o aprimoramento das operações de transporte ferroviário?	Explorar o conceito de digital twin aplicado à área dos transportes ferroviários e entender como este conceito pode contribuir para o aprimoramento das operações ferroviárias.
QI2	De que forma a utilização da tecnologia de VR (realidade virtual) pode contribuir para o aprimoramento das operações de transporte ferroviário?	Entender como a tecnologia de VR (realidade virtual) pode colaborar para o aprimoramento de operações ferroviárias.
QI3	Qual é a melhor maneira de traduzir os dados referentes às variáveis monitoradas em informação visual e textual?	Identificar a melhor forma de traduzir os dados referentes às variáveis em informação visual e textual, de forma a construir uma interface gráfica intuitiva e compreensível.

1.4 Estrutura do Trabalho

O presente trabalho de dissertação encontra-se estruturado em nove capítulos. O primeiro capítulo realiza uma contextualização do tema e do projeto de investigação no qual este trabalho enquadra-se, além de apresentar as motivações, as oportunidades de contribuição, os objetivos almejados, as questões de investigação e a estruturação do trabalho.

O segundo capítulo começa por sumarizar a introdução e a difusão do conceito de *digital twin* nas últimas duas décadas. Em seguida, é apresentada uma revisão bibliográfica dos principais estudos realizados acerca deste tema, categorizados segundo os estágios do processo de PLM em que se encaixam. Por fim, são detalhadas as tecnologias-chave para a implementação de *digital twins*.

No terceiro capítulo, é realizada uma explicação breve do conceito de *digital twin* e são descritos os métodos de investigação a serem seguidos. O quarto capítulo, por sua vez, introduz os requisitos funcionais e os elementos e variáveis do veículo ferroviário definidos para o escopo do projeto. Neste capítulo também enumeram-se as ferramentas tecnológicas consideradas para a construção do protótipo de *digital twin*, assim como as justificativas para as escolhas feitas.

No quinto capítulo, detalha-se a arquitetura do protótipo desenvolvido, assim como os processos de implementação das três componentes do protótipo, nomeadamente a base de dados, o servidor *web* e a aplicação móvel para visualização dos dados do *digital twin*. No sexto capítulo, é especificado o processo de elaboração do inquérito de avaliação de qualidade do protótipo de *digital twin* e, em seguida, são analisados os resultados obtidos.

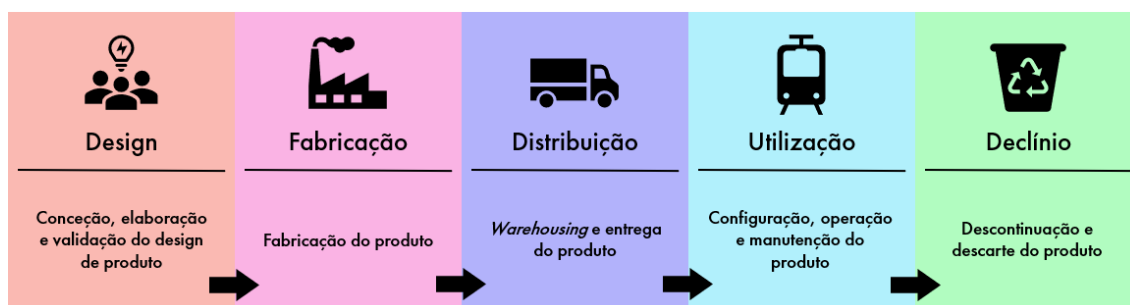
O sétimo capítulo apresenta as conclusões do trabalho e os possíveis aprimoramentos que podem ser feitos no protótipo desenvolvido, além de propor estudos futuros a serem realizados acerca deste tema. Finalmente, os capítulos oito e nove apresentam, respetivamente, as referências bibliográficas e os apêndices.

2. Revisão Bibliográfica

Para o desenvolvimento da revisão bibliográfica, foram realizadas pesquisas nas principais bases de dados juntamente com a utilização do método de *snowballing* a partir de artigos de revisão de literatura da área de *digital twins*.

Este capítulo está estruturado da seguinte forma: a seção 2.1 apresenta um breve histórico acerca da criação e popularização do conceito de *digital twin*; a seção 2.2 descreve alguns dos trabalhos realizados nesta área recentemente, classificados de acordo com os estágios do processo de PLM (*product lifecycle management*) – segundo as definições de Stark (2015) e Lim et al. (2020) - no qual foram aplicados; a seção 2.3 enumera as principais tecnologias que viabilizam a implementação de *digital twins*; finalmente, a seção 2.4 apresenta as conclusões do estudo de revisão bibliográfica. A Figura 1 apresenta os estágios do processo de PLM e suas respectivas tarefas associadas.

Figura 1: Estágios do Processo de PLM



Nota. Baseado em Lim et al. (2020).

2.1 Introdução e Difusão do Conceito de *Digital Twin*

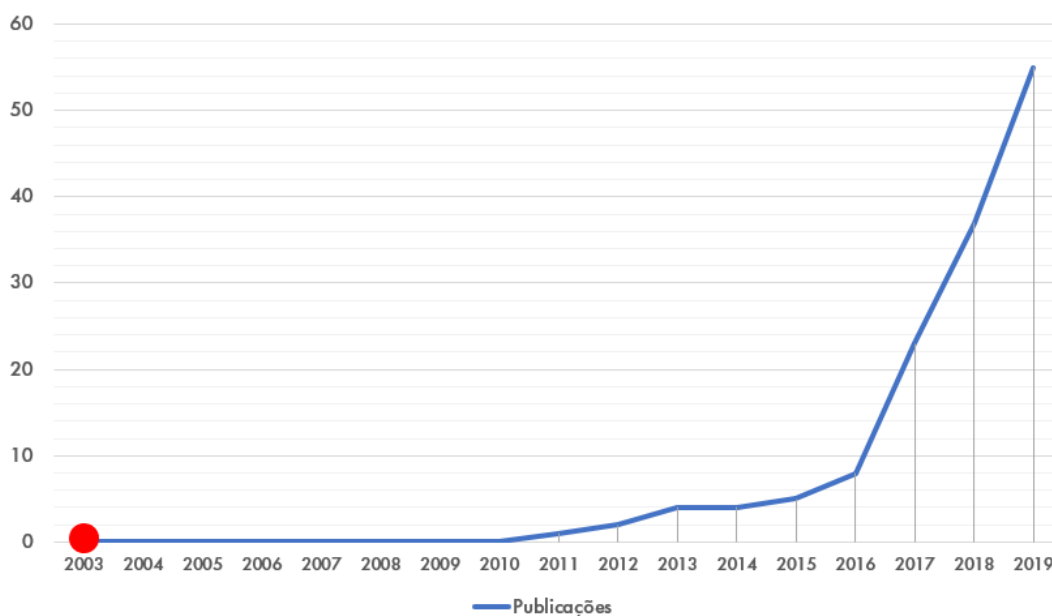
O conceito, assim como o próprio termo “*digital twin*”, foram introduzidos em 2003 por Grieves no curso de *Product Lifecycle Management* da Universidade de Michigan. Na época, a noção de representações virtuais de produtos físicos reais estava em sua infância e as limitações

tecnológicas exigiam que a coleta de dados relacionados ao produto real fosse feita de forma manual, através de papel (Grieves, 2015). Estas mesmas limitações foram a principal causa da escassa exploração e aplicação prática do conceito de *digital twin* nos anos seguintes à sua introdução (Tao et al., 2019).

Embora pouco específico, um modelo preliminar de *digital twin* foi proposto por Grieves na época. Este modelo possuía três componentes principais: o produto real, o produto virtual e as conexões de dados responsáveis por interligar os produtos real e virtual (Grieves, 2015; Tao et al., 2019).

O acelerado avanço das tecnologias de comunicação, sensores, simulação e análise de *big data* ao longo dos anos 2000 contribuiu para uma verdadeira explosão da aplicação prática do conceito de *digital twin* na última década, além de possibilitar que a coleta de dados passasse a ser realizada de forma automatizada (Tao et al., 2019). A Figura 2 apresenta o crescimento no número de publicações científicas relacionadas à *digital twin* desde a introdução deste conceito.

Figura 2: Quantidade anual aproximada de publicações científicas relacionadas a *Digital Twin*



Nota. Baseado em Tao et al. (2019) e Lim et al. (2020).

Em 2011, foi publicado o primeiro artigo de revista científica acerca deste conceito (Tao et al., 2019). Neste artigo, Tuegel et al. (2011) buscaram aplicar o conceito de *digital twin* para aprimorar o processo de predição do tempo de vida útil de aeronaves, que à época consistia na utilização de modelos físicos individuais das diferentes categorias de estresse exercidas sobre a estrutura do avião. Para esta finalidade, os autores propuseram a utilização de modelos de alta-fidelidade para cada unidade de uma variedade específica de aeronave existente em um inventário. Estes modelos poderiam, através do uso de dados relacionados à trajetória de voo estimada e as manobras esperadas para uma determinada missão incumbida à aeronave, realizar uma simulação

O Conceito de Digital Twin como Ferramenta de Apoio à Operação de Veículos Ferroviários e calcular o nível de estresse que seria exercido sobre a estrutura da máquina como resultado do voo (Tuegel et al., 2011).

Em um artigo publicado em 2012, a NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) formalizou a definição de *digital twin* como uma simulação multifísica, multiescalar, probabilística e de alta-fidelidade que utiliza dados históricos, dados obtidos através de sensores e modelos físicos para refletir o estado de um produto real. Neste artigo, os autores propuseram a utilização de *digital twins* para solucionar as deficiências dos métodos convencionais de certificação de veículos e gerenciamento de frota empregados na NASA e na Força Aérea dos Estados Unidos (Glaessgen & Stargel, 2012).

Em 2014, o primeiro *white paper* sobre *digital twins* foi publicado por Grieves, o qual indicava o crescimento das aplicações práticas deste conceito. Desde então, *digital twins* vêm tornando-se um tópico de investigação cada vez mais popular (Tao et al., 2019).

2.2 Estudos e Aplicações de *Digital Twins*

Embora grande parte das aplicações de *digital twins* esteja atualmente concentrada nos estágios de fabricação e utilização (Tao et al., 2019), este conceito já é empregado em todo o processo de PLM. As subseções 2.2.1 a 2.2.5 apresentam alguns dos estudos realizados acerca deste tema na última década.

2.2.1 Estágio de Design

Digital twins representam uma forma de tornar o estágio de *design* de produto mais dinâmico e responsivo (Lim et al., 2020). Segundo Canedo (2016), o conceito de *digital twin* representa uma nova forma de gerenciamento de equipamentos e sistemas IoT ao longo do seu ciclo de vida. Em relação ao *design* de produto, ele considera que este processo pode ser aprimorado através do *feedback* fornecido por *digital twins* das instâncias de um determinado produto em utilização pelo público. Isto permitiria ao fabricante analisar como os usuários fazem uso do produto e de que forma diferentes ambientes promovem a sua deterioração (Canedo, 2016).

Guo et al. (2019) propuseram uma abordagem modular com o objetivo de auxiliar no desenvolvimento de um *digital twin* flexível para a avaliação de *designs* de fábricas. Os autores fazem uso de módulos parametrizados e reutilizáveis que correspondem à entidades físicas reais, de forma a flexibilizar, dinamizar e acelerar o processo de elaboração do *digital twin*. Esta abordagem resulta em um modelo de simulação composto por módulos independentes entre si, o que agiliza eventuais alterações no modelo e possibilita a colaboração entre múltiplos *designers* (Guo et al., 2019).

O modelo de *digital twin* proposto pelos autores serve de auxílio para *designers* e *shareholders* na avaliação do *design* da fábrica e na predição da capacidade de processamento da

fábrica e da taxa de retorno sobre investimento, além de ser capaz de emular as estratégias de controle de logística e produção (Guo et al., 2019).

Com o intuito de possibilitar a elaboração de *digital twins* geometricamente mais fiéis à realidade, Schleich et al. (2017) propuseram um modelo compreensivo baseado no conceito de *Skin Model Shapes*, o qual leva em consideração divergências na geometria de um produto resultantes dos processos reais de fabricação (Anwer et al., 2013). A partir da incorporação de simulações de eventuais divergências geométricas, este modelo possibilita que as diferentes variações que podem ocorrer na geometria de um produto ao longo do seu ciclo de vida sejam levadas em conta, visando a garantia de que as características geométricas requeridas sejam atendidas (Schleich et al., 2017).

Tao et al. (2018) propuseram um *framework* de *design* de produto baseado em *digital twin* com o objetivo de conectar a representação virtual do produto e os dados coletados, no qual a representação virtual consiste tanto na reprodução das funcionalidades, comportamentos e especificações previstas pelos *designers*, quanto na reprodução do estado do produto físico em tempo real (Tao et al., 2018).

Os autores apresentaram um caso de uso deste *framework* no processo de *redesign* de bicicletas usadas por um serviço de *bikesharing*. A representação virtual da bicicleta receberia dados referentes à, por exemplo, aceleração, velocidade, nível de pressão dos pneus, manutenção e processo de produção ao longo do seu ciclo de vida útil e modificar-se-ia em sincronia com o estado da bicicleta real. Isto permitiria que os *designers* realizassem uma análise mais completa da condição do produto e facilitaria a identificação de falhas no *design* e das necessidades dos usuários (Tao et al., 2018).

Dias-Ferreira et al. (2018) introduziram uma arquitetura de referência para sistemas de produção inspirados no funcionamento de sistemas biológicos, batizada de *BIOSOARM*. Nesta arquitetura, tanto os equipamentos de chão de fábrica quanto os componentes dos produtos funcionam como elementos individuais e são representados no ambiente virtual como entidades autônomas totalmente dissociadas entre si. Estes elementos interagem e cooperam uns com os outros, o que promove o surgimento de um comportamento auto-organizado e, conseqüentemente, resulta nos fluxos de produção necessários (Dias-Ferreira et al., 2018). Os *digital twins* podem ser utilizados nesta arquitetura como uma forma de apoio à visualização e análise da eficácia dos diferentes padrões de interação existentes no sistema (Lim et al., 2020).

Zheng et al. (2018) propuseram uma abordagem de *design* para inovação em serviços de *Smart Product-Service Systems*, baseada em dados coletados por sensores. Os autores apresentaram um caso de estudo de uma máscara respiratória equipada com sensores para comunicação em tempo real, os quais recolhem dados referentes à variáveis como pressão e temperatura. A partir destes dados, é possível calcular, por exemplo, o padrão de respiração de um usuário e o nível de adequação da máscara ao rosto de quem está a usá-la. Estas informações podem ser usadas em conjunto com um *digital twin* que representa as características faciais de

um usuário para simular as condições de uso de modelos diferentes de máscaras respiratórias (Zheng et al., 2018).

2.2.2 Estágio de Fabricação

O conceito de *digital twin* proporciona uma forma de tornar o processo de fabricação mais flexível, fiável e previsível (Tao et al., 2019). Weyer et al. (2016) previram a importância dos *digital twins* como uma das grandes inovações em tecnologias de modelação, simulação e otimização da última década. Segundo os autores, a capacidade dos *digital twins* de sincronizar uma representação virtual com um equipamento físico real auxilia os operadores na monitoração de processos de fabricação complexos (Weyer et al., 2016).

Tao e Zhang (2017) propuseram o conceito de *digital twin shop-floor*, o qual consiste em uma reprodução virtual da geometria, comportamento e regras de um determinado chão de fábrica. Este *digital twin* é atualizado em tempo real de acordo com dados relativos às operações realizadas no chão de fábrica físico. Isto possibilita que o *digital twin* efetue tarefas de simulação, avaliação e otimização, além de regular as operações físicas automaticamente conforme for necessário (Tao & Zhang, 2017).

Ameri e Sabbagh (2016) introduziram o conceito de *Digital Factory* para auxiliar no processo de *sourcing*, o qual consiste na procura e avaliação de fornecedores de bens e serviços. As decisões de *sourcing* causam grande impacto na agilidade e responsividade das empresas encarregadas da fabricação de produtos, porém também representam um processo demorado, uma vez que frequentemente é necessária a realização de visitas às instalações dos fornecedores e de execuções de testes de produção a fim de analisar suas capacidades e qualificações. Este gasto de tempo continua presente mesmo se for considerada a avaliação dos fornecedores através de perfis *online*, por conta da enorme quantidade de resultados retornados por pesquisas *web* (Ameri & Sabbagh, 2016).

Com estas limitações em mente, o conceito de *Digital Factory* proposto pelos autores representa o *digital twin* de uma fábrica física real. Ele fornece uma representação virtual das instalações de produção, incluindo todo o maquinário instalado, os equipamentos de manuseio de material e o *layout* da fábrica. Com isto, uma *Digital Factory* fornece uma ontologia formal usada para representar as capacidades de produção das instalações. Através da consulta e análise destas informações, as empresas conseguem compreender mais à fundo as capacidades tecnológicas dos fornecedores, o que resulta, conseqüentemente, em um processo de tomada de decisão mais assertivo (Ameri & Sabbagh, 2016).

Com o objetivo de ultrapassar as limitações dos processos convencionais de correção geométrica e estrutural de componentes metálicos fabricados através da manufatura aditiva, Knapp et al. (2017) desenvolveram um *framework* baseado em *digital twin* para realizar previsões acerca dos fatores mais críticos que afetam a estrutura metalúrgica e as propriedades dos componentes fabricados, como variações temporais e espaciais das taxas de resfriamento e

parâmetros de solidificação. A utilização deste *framework* proporciona a minimização dos testes empíricos empregados nas abordagens convencionais para analisar os efeitos das variáveis do processo sobre a estrutura do componente, os quais são dispendiosos e demorados (Knapp et al., 2017).

Buscando diminuir os custos relacionados à alterações tardias resultantes de falhas na geometria de produtos de montagem complexa, Söderberg et al. (2017) propuseram a utilização de um *digital twin* para garantia da qualidade geométrica. Este *digital twin* seria aplicado ainda na fase de *design*, onde forneceria representações geométricas das partes individuais do produto final e representações das relações cinemáticas, além de efetuar simulações de variações na geometria para identificar as tolerâncias dos componentes. Posteriormente, no estágio de fabricação, o *digital twin* utilizaria os modelos de simulação de variações, juntamente à dados coletados através da inspeção física do produto e do sistema de produção, para controlar o processo de fabricação e identificar e corrigir eventuais falhas (Söderberg et al., 2017).

Howard et al. (2020) introduziram o conceito de *digital twin* ao processo de produção de estufas comerciais. Neste caso, o *digital twin* é capaz de estimar os estados futuros de uma estufa que está em fabricação, baseando-se tanto em dados anteriores armazenados em um banco de dados quanto em dados coletados em tempo real através de sensores. Isto proporciona a otimização do processo de produção como um todo, além de aumentar a eficiência energética do sistema (Howard et al., 2020).

Vachálek et al. (2017) apresentaram a aplicação do conceito de *digital twin* para fins de otimização de uma linha de produção. Os autores utilizaram um simulacro da linha de produção de cilindros pneumáticos juntamente à um *digital twin* detalhado do processo físico real. Além de possibilitar a simulação de cenários alternativos do processo de fabricação através da modificação de parâmetros de produção, o *digital twin* também foi capaz de monitorar o processo em tempo real e identificar oportunidades de minimização do consumo de recursos (Vachálek et al., 2017).

Além de aprimorar os processos de fabricação de produtos, o conceito de *digital twin* também possibilita a transição para o paradigma de produção individualizada (Lim et al., 2020). Este paradigma pode ser definido como a fabricação de produtos com o cliente como foco central, na qual necessidades e preferências individuais são transformadas em produtos e serviços personalizados a um custo acessível (Guo et al., 2020).

Zhang et al. (2017) propuseram uma nova abordagem para apoio ao *design* e otimização da linha de produção de vidro com o paradigma de fabricação individualizada em mente. Esta abordagem utiliza um *digital twin* para fornecer um conjunto de modelos tridimensionais que representam os diversos equipamentos necessários para o processo de fabricação, juntamente à uma visualização das variáveis de configuração, de forma à auxiliar na tarefa de *design* da linha de produção. O *digital twin* também utilizado para realizar simulações do layout do sistema e do processo de fabricação do produto, com a finalidade de identificar possíveis melhorias no *design* do processo (Zhang et al., 2017).

2.2.3 Estágio de Distribuição

O conceito de *digital twin* representa uma forma de aumentar a eficiência e segurança de armazéns inteligentes, além de possibilitar o rastreamento remoto e em tempo real das operações de logística (Lim et al., 2020).

A utilização de robôs industriais para operações em armazéns constitui um risco significativo à segurança dos operadores humanos, pelo fato de serem equipamentos extremamente pesados e estarem em constante movimento. Por conta disto, caso seja necessária a intervenção de um operador humano nos processos do armazém, toda a frota de robôs é parada e permanece neste estado até que o operador humano tenha deixado o local. Esta interrupção das operações pode resultar em um enorme impacto negativo na eficiência das operações, especialmente em armazéns de grande porte (Petković et al., 2019).

Com este problema em mente, Petković et al. (2019) introduziram um algoritmo para estimar as intenções dos operadores humanos, o qual, segundo os autores, permitiria que robôs e humanos trabalhassem simultaneamente em um modelo de armazém integrado. Este algoritmo é baseado na Teoria da Mente, a qual é uma concepção humana intuitiva do estado mental de outros seres humanos. Utilizando um *digital twin* de um armazém de grande porte em realidade virtual para a realização de simulações com seres humanos reais, o algoritmo desenvolvido pelos autores foi capaz de estimar, de forma precisa, as intenções dos operadores humanos em relação a múltiplos objetivos pré-determinados, baseando-se na posição e orientação dos mesmos (Petković et al., 2019).

Bilberg e Malik (2019) propuseram um *digital twin* para controle de processos de montagem colaborativos entre seres humanos e robôs. O *digital twin* realiza o balanceamento das tarefas de montagem entre ambos, baseando-se na ordem de execução das tarefas, no grau de adequação de cada tarefa para um robô e na disponibilidade dos recursos (como os próprios robôs e operadores humanos). O *digital twin* proposto pelos autores também é capaz de identificar atrasos no processo causados pela variabilidade de tempo dos operadores humanos e instruir os robôs a interromperem suas tarefas atuais para auxiliar nas tarefas atrasadas, além de otimizar as trajetórias dos robôs a fim de prevenir colisões com os humanos (Bilberg & Malik, 2019).

Com a finalidade de auxiliar no *scheduling* e roteamento de AGVs (*automated guided vehicles*) no ambiente logístico de sistemas de produção do tipo *job-shop*, Bottani et al. (2017) apresentaram um protótipo de *digital twin* de um AGV baseado no paradigma de sistema ciberfísico. Pelo fato do AGV ser capaz de comunicar-se com outros equipamentos baseados neste mesmo paradigma, o *digital twin* proposto utiliza os dados recebidos pelo AGV físico para simular as diferentes trajetórias possíveis e, conseqüentemente, identificar a melhor decisão a ser tomada em uma determinada situação. Isto permite que o AGV tenha a capacidade de adaptar-se automaticamente a diferentes cenários, o que resulta em uma maior otimização dos processos de produção e logística (Bottani et al., 2017).

Defraeye et al. (2019) desenvolveram uma abordagem baseada em *digital twin* para apoio à redução do desperdício e à garantia da qualidade da cadeia logística de distribuição de mangas. Por meio da medição das condições de temperatura ambiente ao longo do processo de distribuição, do cálculo da evolução de determinados atributos de qualidade associados à reações de degradação bioquímica dependentes da temperatura e da elaboração de um simulacro da fruta real capaz de mensurar a temperatura da polpa de uma manga, o *digital twin* desenvolvido pelos autores permitiu compreender e prever em quais estágios da cadeia logística ocorria a perda de qualidade do produto (Defraeye et al., 2019).

2.2.4 Estágio de Utilização

A aplicação de *digital twins* no estágio de utilização caracteriza uma forma de suportar a otimização das configurações dos equipamentos e ferramentas, a predição de períodos de manutenção e o *design* de novas gerações de produtos (Lim et al., 2020).

Liu et al. (2019) desenvolveram uma abordagem baseada em *digital twin* para apoiar o planejamento de processos de usinagem de motores à diesel através da análise e reutilização do conhecimento relativo a processos anteriores. O *digital twin* construído pelos autores é constituído pelas informações de geometria e pelos dados relativos ao estado atual dos equipamentos. Estes dados foram então combinados ao conhecimento de processo acumulado para, em seguida, serem filtrados através de um algoritmo de cálculo da similaridade, o qual descartou as informações de conhecimento de processo que não eram correspondentes à operação atual. Deste processo resultou o conjunto de conhecimento de processo candidato ao procedimento de otimização. Finalmente, as componentes do motor à diesel foram aplicadas a um módulo protótipo com o intuito de verificar a eficácia do método elaborado (Liu et al., 2019).

Iglesias et al. (2017) introduziram um conjunto de aplicações baseadas em *digital twin* com o intuito de aprimorar o *workflow* de análise de engenharia em operações do desviador do JET (*Joint European Torus*), um experimento operacional acerca da física de plasmas localizado no *Culhan Centre for Fusion Energy*, no Reino Unido. Segundo os autores, as aplicações desenvolvidas possuem potencial aumentar a confiabilidade e os limites operacionais do experimento, além de proporcionar resultados mais precisos (Iglesias et al., 2017).

Haag e Anderl (2018) apresentaram uma prova de conceito de *digital twin* através da sua utilização para fins de monitoração do grau de flexão de uma viga. Os autores elaboraram um *test bench* no qual dois atuadores são usados para aplicar força em ambos os lados da viga, de forma a fazê-la curvar-se. Sensores integrados à estrutura do *test bench* são responsáveis por medir a força resultante e o cálculo do deslocamento da viga é feito através da diferença na posição dos atuadores. Estes dados são enviados a um *digital twin* do *test bench*, o qual é constituído de um modelo tridimensional da estrutura construída e de um *dashboard*. Através desta *dashboard*, os usuários podem monitorar dados relativos à força aplicada na viga e ao deslocamento, assim como controlar os atuadores do *test bench* (Haag & Anderl, 2018).

O Conceito de Digital Twin como Ferramenta de Apoio à Operação de Veículos Ferroviários

Khajavi et al. (2019) propuseram um modelo de aplicação de *digital twin* para fins de monitoração do estado da fachada de um edifício. Os autores inicialmente construíram uma rede *wireless* formada por sensores instalados nas partes internas e externas das janelas de um escritório localizado no edifício selecionado, com o objetivo de comparar diferentes configurações de rede e analisar o impacto da distância na comunicação entre os sensores e o *gateway* da rede. Os sensores instalados são responsáveis pela medição de uma série de variáveis, como o grau de iluminação, a temperatura e o nível de umidade relativa do ambiente (Khajavi et al., 2019).

Baseando-se nos resultados desta fase inicial, os autores construíram, em seguida, uma rede *wireless* constituída por seis sensores instalados ao longo de um trecho da fachada do mesmo edifício. Os dados coletados por estes sensores foram utilizados como base para a elaboração de um *digital twin*, o qual possibilitou a visualização dos níveis de iluminação da fachada em tempo real. Segundo os autores, a utilização de um *digital twin* baseado nesta abordagem representa uma forma de apoiar a eficiência energética, pois possibilita a monitoração contínua da distribuição de iluminação natural em toda a fachada de um edifício (Khajavi et al., 2019).

As empresas Alstom e Simplan desenvolveram um *digital twin* – através da utilização da ferramenta de simulação Anylogic – com o objetivo de otimizar os serviços de transporte na West Coast Main Line, uma das vias-férreas mais importantes do Reino Unido. Mesmo com a existência de cronogramas fixos para as operações dos comboios, a necessidade de regimes de manutenção e a possibilidade da ocorrência de falhas ou acidentes faz com que seja extremamente difícil prever a localização dos comboios com alguns dias de antecedência. Considerando que simulações realizadas a partir de dados fixos mostram-se inadequadas neste caso, o *digital twin* possibilitou a exploração mais eficiente e precisa de diferentes cenários de otimização dos serviços da via-férrea (The AnyLogic Company, s.d.).

Jeschke e Grassmann (2021) propuseram uma estratégia de implementação de *digital twins* para o sistema de transporte ferroviário alemão. Foi apresentado pelos autores um caso de uso de um comboio do *Intercity Express*, um serviço de transporte ferroviário de alta velocidade que interliga diversas cidades da Alemanha e de outros países europeus. Segundo os autores, ao possibilitar a representação de um objeto real em um ambiente virtual, o conceito de *digital twin* possibilita, especificamente no contexto dos transportes ferroviários, a monitoração operacional de material circulante em tempo real e a identificação de alterações não programadas nas operações dos serviços. A partir de avaliações e simulações baseadas em dados, um *digital twin* é capaz de realizar previsões antecipadas de eventos futuros, o que viabiliza a manutenção preditiva e a efetuação de medidas preventivas contra possíveis falhas, além de evitar o desperdício de recursos financeiros (Jeschke & Grassmann, 2021).

Os autores do estudo também identificam alguns dos maiores obstáculos para a implementação de *digital twins* no contexto do serviço de transporte ferroviário alemão. Eles indicam a ausência de normas e padrões técnicos para o funcionamento interoperável de *digital twins* em uma rede, assim como barreiras legais para a obtenção e utilização de dados

provenientes dos sistemas de controle e monitoração pré-existentes nos comboios do sistema (Jeschke & Grassmann, 2021).

2.2.5 Estágio de Declínio (*End-of-Life*)

A utilização de *digital twins* é uma forma de auxiliar na redução do impacto ambiental resultante do descarte de produtos, através do apoio à predição da vida útil do produto, maximização da recuperação de material e reciclagem inteligente (Lim et al., 2020).

O processo de *re-manufacturing* de motores consiste na reutilização de componentes úteis de motores expirados para a fabricação de novos motores. Este processo promove o desenvolvimento sustentável através da economia de matéria-prima, consumo de energia e recursos financeiros e humanos. Contudo, a necessidade da efetuação de operações como limpeza, decomposição e avaliação dos motores expirados, assim como a alta variabilidade da cadeia logística destes materiais representam desafios ao planeamento dos processos de *re-manufacturing* (Lu et al., 2019).

Com o objetivo de enfrentar estes obstáculos, Lu et al. (2019) apresentaram uma abordagem baseada em *digital twin* para o planeamento de operações de *re-manufacturing* de motores de automóveis. Esta abordagem utiliza dados históricos oriundos de processos tradicionais de produção de motores como base para realizar simulações das operações, o que oferece aos planeadores uma melhor visualização do processo de *re-manufacturing*. Segundo os autores, esta abordagem permite que o planeamento do processo seja feito de forma mais eficiente em comparação com os métodos tradicionais de planeamento (Lu et al., 2019).

Wang e Wang (2019) propuseram a aplicação do conceito de *digital twin* para auxílio aos processos de recuperação e reciclagem de equipamentos eletroeletrónicos expirados. A abordagem desenvolvida pelos autores envolve a aplicação de *digital twins* como avatares virtuais dos equipamentos individuais, os quais refletem o estado do produto ao longo de todo o seu ciclo de vida. Para isto, as informações do estágio de *design* do equipamento – como características geométricas, componentes e eventuais substâncias perigosas – são integradas ao *digital twin*. Os usuários finais são também capazes de atualizar o estado do equipamento ao incluir e alterar informações referentes à localização, reparação e manutenção diretamente no *digital twin*. Após a expiração do produto, os dados acumulados ao longo do seu ciclo de vida são usados pelos responsáveis pela reciclagem como base para as decisões acerca do aproveitamento do equipamento expirado (Wang & Wang, 2019).

2.3 Tecnologias-Chave para a Implementação de *Digital Twins*

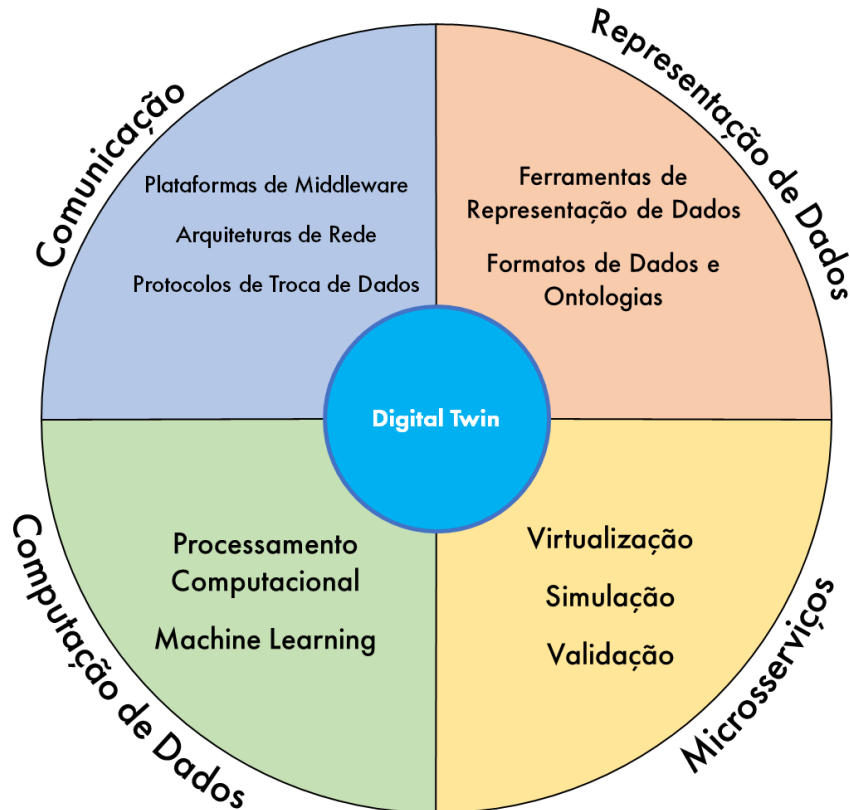
A implementação de *digital twins* requiere a utilização de um conjunto diverso de ferramentas e metodologias, as quais devem ser definidas de acordo com os objetivos almejados.

O Conceito de Digital Twin como Ferramenta de Apoio à Operação de Veículos Ferroviários

Estas podem ser divididas em quatro categorias: comunicação, representação de dados, computação de dados e microsserviços (Lim et al., 2020).

As subseções 2.3.1 a 2.3.4 detalham as principais ferramentas e metodologias usadas na construção de *digital twins*, segundo identificadas por Lim et al. (2020). A Figura 3 apresenta as quatro categorias de componentes tecnológicas necessárias para a construção de um *digital twin*.

Figura 3: Ferramentas e metodologias necessárias para a criação de um *Digital Twin*



Nota. Baseado em Lim et al. (2020).

2.3.1 Comunicação

A aquisição e transmissão de dados são fundamentais para a realização do conceito de *digital twin*. Nesta categoria, estão incluídas plataformas de *middleware*, métodos de arquiteturas de comunicação e protocolos de troca de dados (Lim et al., 2020).

Os métodos de arquitetura de rede envolvem a especificação e integração dos dispositivos físicos de uma rede e suas configurações, e os protocolos de troca de dados que utilizam para realizar a comunicação. Estes protocolos são conjuntos de regras para a comunicação entre os dispositivos de uma rede, o que permite que diferentes entidades possam trocar informações entre

si. Por fim, as plataformas de *middleware* facilitam o gerenciamento de componentes de software distintos, viabilizando a adoção de *digital twins* sem que seja necessária a modificação de infraestruturas já existentes (Lim et al., 2020).

Algumas das arquiteturas de comunicação, protocolos de troca de dados e plataformas de *middleware* mais comuns na criação de *digital twins* são apresentados, respetivamente, nas Tabelas 2, 3 e 4.

Tabela 2: Arquiteturas de comunicação mais utilizadas para a criação de *Digital Twins*

Arquitetura de Comunicação	Descrição
Arquitetura Cliente-Servidor	Modelo computacional no qual um determinado servidor gerencia os recursos utilizados pelos clientes
Arquitetura de Programação J2EE SSH	Plataforma que oferece funcionalidade para o desenvolvimento de aplicações <i>web</i> distribuídas e de múltiplas camadas
Arquitetura Mestre-Escravo	Arquitetura na qual um dispositivo possui controle unidirecional
Arquitetura Orientada à Serviços	Estilo de <i>design</i> de software no qual serviços são fornecidos por componentes da aplicação, através de um protocolo de troca de dados
RESTFul	Estilo de arquitetura de software para a criação de serviços <i>web</i>

Nota. Adaptado de (Lim et al., 2020).

Tabela 3: Protocolos de troca de dados mais utilizados para a criação de *Digital Twins*

Camada do Modelo OSI	Protocolo	Descrição
Aplicação	OPC UA	Protocolo de troca de dados usado para a automação industrial
Apresentação		
Sessão	OPC	Antecessor do OPC UA, o OPC é constituído de uma série de padrões e especificações para a telecomunicação industrial
	MQTT	Protocolo de comunicação padrão ISO baseado no paradigma <i>publish-subscribe</i>
	MTConnect	Protocolo concebido para troca de dados entre equipamentos de chão de fábrica e aplicações para monitoração e análise de dados
	AMQP	Protocolo de padrão aberto para <i>middleware</i> orientado a mensagens
Transporte	TCP	Principal protocolo de transporte, o TCP realiza verificações de erros nos pacotes de dados recebidos para garantir a confiabilidade da comunicação
	UDP	Protocolo para criação de conexões de baixa latência e tolerantes à perdas de dados
Rede	IP	Protocolo para troca de dados entre dispositivos em uma rede
Ligação de Dados	Ethernet/IP	Protocolo de redes industriais amplamente adotado em fábricas
	OpenFlow	Protocolo que oferece acesso ao plano de encaminhamento do <i>switch</i> de uma rede de dispositivos

Nota. Adaptado de (Lim et al., 2020).

Tabela 4: Plataformas middleware mais utilizadas para a criação de *Digital Twins*

Plataforma	Descrição
Docker	Produto PaaS (<i>platform as a service</i>) e SaaS (<i>software as a service</i>) que faz uso de virtualização ao nível de operação para fornecer software em instâncias isoladas conhecidas como containers
Kubernetes	Sistema <i>open source</i> de orquestração de containers para automação dos processos de implementação, gerenciamento e escalação de aplicações
LabVIEW	Plataforma de <i>design</i> de sistemas e ambiente de desenvolvimento
RabbitMQ	Software <i>open-source</i> de <i>message-broker</i>
Thingworx	Plataforma de inovação industrial para entrega rápida de aplicações IoT e experiências em AR

Nota. Adaptado de (Lim et al., 2020).

2.3.2 Representação de Dados

Os dados e conhecimentos de domínio obtidos precisam ser organizados e armazenados para que sejam integrados ao *digital twin*. Ferramentas de representação de dados, como sistemas de gerenciamento de bases de dados não-relacionais (NoSQL) e ontologias – representações das propriedades e relacionamentos entre dados e conceitos de um determinado domínio – são alternativas em potencial para o cumprimento desta tarefa (Lim et al., 2020).

As tabelas 5 e 6 apresentam, respectivamente, as principais ferramentas de representação de dados e formatos de dados adotados para a elaboração de *digital twins*.

Tabela 5: Ferramentas de representação de dados mais utilizadas para a criação de *Digital Twins*

Ferramenta	Descrição
Apache Cassandra	Sistema <i>open source</i> de gerenciamento de bases de dados NoSQL
AWS DynamoDB	Serviço proprietário de bases de dados NoSQL <i>cloud</i>
MongoDB	Software <i>cross-platform</i> para bases de dados NoSQL orientadas à documentos
MS SQL	Sistema de gerenciamento de bases de dados relacionais
MTCConnect Database	Base de dados para informações de todos os produtos MTCConnect
MySQL	Sistema <i>open source</i> de gerenciamento de bases de dados relacionais
SciGraph	Projeto <i>open source</i> para representação de dados de ontologia em Neo4j (sistema de gerenciamento de bases de dados baseadas em grafos)

Nota. Adaptado de (Lim et al., 2020).

Tabela 6: Formatos de dados mais utilizados para a criação de *Digital Twins*

Formato de Dados	Descrição
AutomationML	Formato de dados aberto, padronizado e baseado em XML
SHDR	Formato de dados que contém identificador, data e horário, e valor do item
STEP	Formato aberto para troca de informações de <i>design</i> entre sistemas

Nota. Adaptado de (Lim et al., 2020).

2.3.3 Computação de Dados

A extração de conhecimento prático a partir dos dados heterogêneos obtidos através de sensores não é uma tarefa trivial. Por este motivo, a definição das ferramentas e métodos mais adequados para a realização de consultas e agregação destas informações é uma atividade crucial para a construção correta de um *digital twin*. Ferramentas de processamento computacional e *machine learning* disponibilizam um vasto conjunto de soluções para análise de dados e automação, as quais proporcionam um suporte robusto aos processos de tomada de decisão (Lim et al., 2020).

As tabelas 7 e 8 enumeram algumas das mais populares ferramentas de processamento computacional, e metodologias de análise de dados e *machine learning*, respectivamente.

Tabela 7: Ferramentas de processamento computacional mais utilizadas para a criação de *Digital Twins*

Ferramenta	Descrição
AWS Elastic MapReduce	Ferramentas da AWS (Amazon Web Services) para análise e processamento de <i>big data</i> através do Hadoop (conjunto de soluções <i>open source</i> para processamento de <i>big data</i>)
Elastic Stack	Ferramenta para busca, análise e visualização de dados em tempo real
MatLAB/Simulink	Sistema de processamento de dados
QFSM	Ferramenta gráfica para elaboração de máquinas de estado finito
TensorFlow	Biblioteca <i>open source</i> para programação diferenciável e de fluxo de dados de aplicações de <i>machine learning</i>

Nota. Adaptado de (Lim et al., 2020).

Tabela 8: Metodologias de análise de dados mais utilizadas para a criação de *Digital Twins*

Metodologia	Descrição
Algoritmo NSGA-II	Algoritmo genético multiobjetivo e de ordenação rápida para otimização da performance de máquina
Análise de Elementos Finitos (FEM)	Método numérico para solucionar problemas relacionados à física da engenharia e à física matemática
Filtro Gaussiano	Reduz o ruído para aumentar a precisão dos dados
Modelo Oculto de Markov	Modelo estatístico de Markov no qual assume-se que um determinado sistema é um processo de Markov com estados inobserváveis
Rede Neural Artificial	Sistemas de computação baseados em exemplos e sem regras específicas para cada tarefa
Rede Neural Profunda	Método de <i>machine learning</i> baseado em redes neurais artificiais

Nota. Adaptado de (Lim et al., 2020).

2.3.4 Microsserviços

Segundo Lim et al. (2020), os microsserviços são ferramentas de desenvolvimento de software concebidas como um conjunto de serviços fracamente acoplados. Entre eles estão as ferramentas de virtualização, as quais oferecem apoio à tomada de decisão através da monitoração de serviços relacionados aos equipamentos industriais; ferramentas de simulação e criação de réplicas detalhadas dos equipamentos reais; ferramentas de validação para garantir a precisão e integridade dos dados (Lim et al., 2020).

As principais ferramentas de virtualização, simulação e validação empregadas na criação de *digital twins* são elencadas nas tabelas 9, 10 e 11, respetivamente.

Tabela 9: Ferramentas de virtualização mais utilizadas para a criação de *Digital Twins*

Ferramenta	Descrição
ERP	Gerenciamento em tempo real e integrado dos principais processos de negócio
MES	Controle em tempo real de múltiplos elementos dos processos de fabricação
PLC	Arquitetura de hardware para monitoração e controle de processos de fabricação
SCADA	Arquitetura de controle de sistema que engloba dispositivos, comunicação de dados e interface gráfica de usuário para gerenciamento da supervisão de processos

Nota. Adaptado de (Lim et al., 2020).

Tabela 10: Ferramentas de simulação mais utilizadas para a criação de *Digital Twins*

Ferramenta	Descrição
ANSYS Simplorer	Ferramenta para simplificação de simulações multidomínio em um ambiente de <i>design</i>
Autodesk Revit	Software de modelação de informações acerca de edifícios
EasySIM	Software para <i>design</i> e simulação de operações
MWorks	Ferramenta <i>open source</i> para <i>design</i> e execução de experimentos em tempo real
Plant Simulation	Ferramenta para modelação, simulação e otimização de sistemas e processos de produção
Unity	<i>Game engine</i> multiplataforma para criação de modelos e simulações

Nota. Adaptado de (Lim et al., 2020).

Tabela 11: Ferramentas de validação mais utilizadas para a criação de *Digital Twins*

Ferramenta	Descrição
ANSYS	Software que faz uso do método de elementos finitos para solucionar modelos discretos
GE OpFlex	Pacote de soluções para análise e redução de cenários não-planejados
Tecnomatix Process Simulate	Software de PLM e gerenciamento de processo

Nota. Adaptado de (Lim et al., 2020).

2.4 Conclusões

O rápido avanço das tecnologias de sensores, comunicação, simulação e análise de *big data* ao longo das décadas de 2000 e 2010, juntamente à gradativa transição das indústrias para o paradigma de *smart manufacturing*, fomentaram o crescimento exponencial da aplicação prática e do interesse científico no conceito de *digital twin* nos últimos anos. Por constituírem um importante suporte à simulação e permitirem a monitoração em tempo real do estado de produtos e operações, os *digital twins* representam uma das principais tecnologias da Indústria 4.0.

Por conta disto, grande parte da investigação científica acerca do conceito de *digital twin* está atualmente voltada para processos industriais, com especial foco na monitoração do estado de um produto ao longo do processo de fabricação e na otimização das operações de chão de fábrica. Há, até o momento, escassa exploração do potencial deste conceito para a área dos transportes, sobretudo no que se refere aos transportes ferroviários. Levando isto em consideração, este trabalho busca preencher esta lacuna através do desenvolvimento de um protótipo de *digital twin* para apoio à monitoração de um veículo ferroviário hipotético

3. Metodologia e Definição de Requisitos

Os requisitos do protótipo desenvolvido para o presente trabalho de Dissertação foram definidos com base em reuniões e *workshops* com os parceiros do projeto Ferrovia 4.0, assim como em documentos de requisitos elaborados pelos envolvidos. Estes documentos preveem a construção de *digital twins* tanto para os veículos ferroviários quanto para a via férrea, além de um sistema de realidade aumentada para permitir a fácil visualização dos dados e condições dos veículos e da via. Este sistema será composto por duas partes: um protótipo com componentes de VR e AR, para visualização das informações de ambos os *digital twins*; um protótipo de assistente do operador de manutenção, para digitalização dos processos de manutenção dos comboios. No primeiro protótipo também está prevista uma componente de simulação de cenários de funcionamento dos veículos (Projeto Ferrovia 4.0, s.d.).

Para fins de escopo deste projeto de Dissertação, foi considerada somente a componente de visualização dos dados do *digital twin* dos veículos ferroviários, com apoio de VR para interação com modelo 3D do veículo. O protótipo desenvolvido para o presente trabalho, contudo, encontra-se apto para integração com as restantes componentes previstas no projeto Ferrovia 4.0.

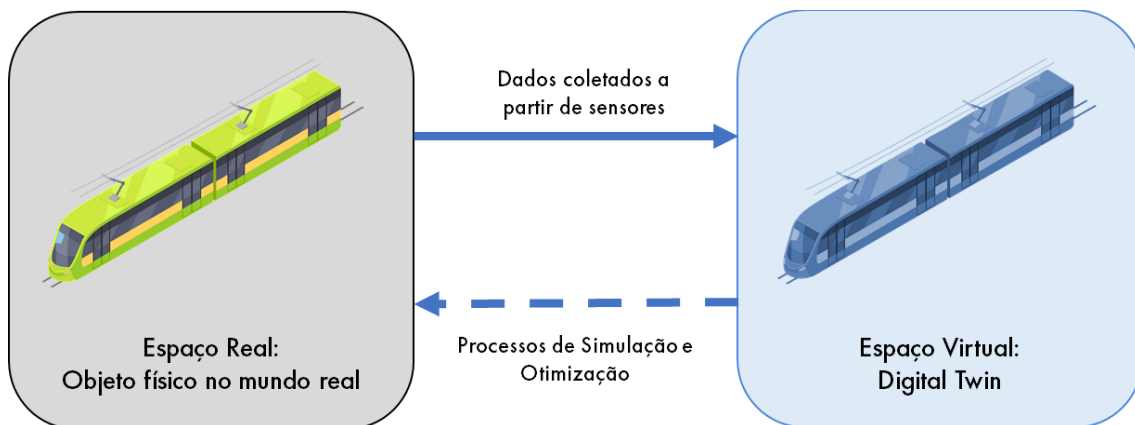
Este capítulo divide-se em três seções: a seção 3.1 define o conceito de *digital twin*; a seção 3.2 introduz os métodos de investigação que foram empregues no presente trabalho; a seção 3.3 apresenta os requisitos funcionais definidos para o protótipo, através de um diagrama de casos de uso; a seção 3.4 descreve as componentes do veículo ferroviário selecionadas para inclusão no escopo do protótipo, assim como as respetivas variáveis definidas para cada componente do veículo; por fim, a seção 3.5 detalha as ferramentas tecnológicas necessárias e as opções consideradas para a construção do protótipo.

3.1 O Conceito de *Digital Twin*

Embora não exista uma definição única para o conceito de *digital twin*, este pode ser definido, essencialmente, como uma descrição compreensiva - tanto física quanto funcional - de

um componente, produto ou sistema, incluindo todo o tipo de informação que poderá ser útil durante todas as fases do seu ciclo de vida (Boschert & Rosen, 2016). Juntamente à utilização de sensores para aquisição de dados e ferramentas de análise de *big data* e inteligência artificial, um *digital twin* pode ser utilizado para monitoração, diagnóstico, prognóstico e otimização. Através da avaliação de estados atuais de operação, análise de problemas históricos e predição de tendências futuras, um *digital twin* proporciona um suporte mais completo à tomada de decisão (Qi et al., 2021). A Figura 4 apresenta a estrutura essencial do conceito de *digital twin*.

Figura 4: Conceito de *Digital Twin*



Nota. Baseado em Grieves (2015).

Dado o dinamismo, rapidez e praticidade oferecidos pelos *digital twins* em comparação com as soluções de monitoração e otimização tradicionais utilizadas no contexto industrial, esta tecnologia desponta como um dos principais pilares da Indústria 4.0, a qual representa uma mudança para um paradigma que emprega ferramentas de simulação, inteligência artificial e análise de dados com o objetivo de aumentar a produção e otimizar os processos industriais (Lim et al., 2020). Além disso, como demonstrado no capítulo anterior, o conceito de *digital twin* tem sido aplicado também em contextos não relacionados diretamente com a produção industrial. Isto pode ser explicado por sua grande flexibilidade, visto que as ferramentas tecnológicas e as metodologias empregadas na construção de um *digital twin* são dependentes do contexto e das finalidades almejadas.

3.2 Métodos de Investigação

Buscando atingir os objetivos pretendidos, foi construído um protótipo de *digital twin* de uma determinada classe de comboios hipotética, baseada nos veículos operados pelos serviços de transporte público em Portugal. Uma aplicação móvel serve como uma *dashboard* deste *digital*

twin, a qual oferece ao usuário uma visualização das métricas referentes à uma série de variáveis associadas às componentes dos veículos hipotéticos, assim como um modelo tridimensional genérico interativo de um comboio.

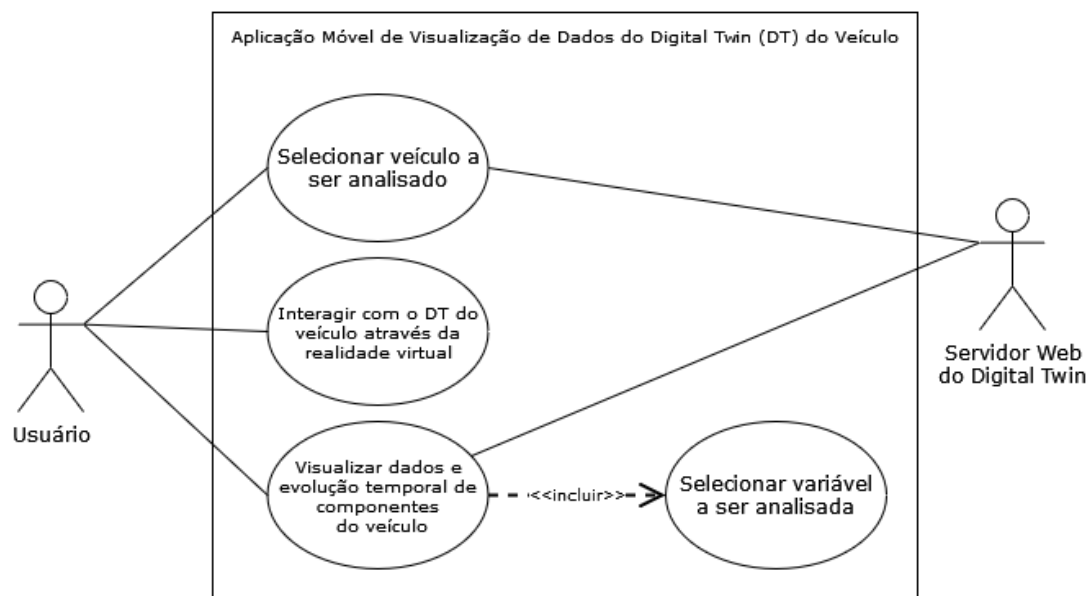
Os dados referentes a estas variáveis foram armazenados em uma base de dados, a qual é acessada pela aplicação através de solicitações à ficheiros armazenados em um servidor *web*. Estes ficheiros realizam consultas diretamente na base de dados e retornam as informações solicitadas à aplicação móvel.

Parceiros envolvidos no projeto de investigação no qual o trabalho proposto se enquadra acompanharam, por meio de reuniões e *workshops*, a construção do protótipo desde a fase de definição de requisitos. A validação final do protótipo foi realizada através de um inquérito de avaliação de qualidade, o qual foi enviado aos parceiros do projeto para apreciação tanto do grau de adequação da interface gráfica da aplicação móvel, quanto do potencial do protótipo para apoio às operações ferroviárias em um contexto real.

3.3 Requisitos Funcionais

O diagrama de casos de uso apresentado na Figura 5 foi construído a partir das funcionalidades definidas para a aplicação móvel de visualização de dados do *digital twin*.

Figura 5: Diagrama de casos de uso da aplicação móvel do protótipo de *Digital Twin*



3.4 Definição das Componentes e Variáveis

As componentes e variáveis a serem incluídas no escopo do protótipo foram também definidas junto aos parceiros do projeto, baseando-se em indicadores relevantes para a avaliação das condições de funcionamento dos veículos. As componentes e as respectivas variáveis definidas para o projeto são apresentadas na Tabela 12.

Tabela 12: Componentes e variáveis definidas para o escopo do protótipo de *Digital Twin*

Componente	Variáveis	Descrição
Caixa de Eixo	Temperatura	Temperatura da caixa de eixo, medida em graus Celsius.
	Vibração	Vibração da caixa de eixo durante o funcionamento do veículo, medida em metros por segundo ao quadrado (m/s^2).
Suspensões Primárias	Deslocamento	Deslocamento entre a caixa de eixo e o bogie, causado pela deformação das suspensões primárias. Medido em centímetros (cm).
	Deformação	Torção das suspensões primárias. Medida em newton por metro (N/m).
Rodados	Temperatura	Temperatura dos rodados, medida em graus Celsius.

3.5 Revisão Tecnológica

Para o desenvolvimento do sistema pretendido neste trabalho, são necessárias quatro componentes tecnológicas principais: uma *engine* para o desenvolvimento dos protótipos, um sistema de gerenciamento de base de dados relacional, um software de servidor *web* e uma solução para isolamento da base de dados e servidor *web* do restante do ambiente de desenvolvimento. De forma semelhante aos demais requisitos do protótipo, as principais alternativas disponíveis para cada uma das componentes tecnológicas foram discutidas junto aos parceiros do projeto de investigação. As alternativas consideradas, assim como as justificativas para as ferramentas selecionadas para o projeto, são apresentadas nas subseções 4.3.1 a 4.3.4.

3.5.1 *Engine* de Desenvolvimento de Software

Embora pensadas primeiramente para o desenvolvimento de videogames, as *game engines* são ferramentas extremamente versáteis que oferecem uma vasta gama de bibliotecas e *plugins* para a construção de software interativo. Além disso, muitas das principais *game engines* existentes no mercado são gratuitas para uso não-comercial ou são projetos *open source*. Por estes motivos, as *game engines* foram selecionadas como as ferramentas mais adequadas para o desenvolvimento dos protótipos propostos neste trabalho. As *game engines* consideradas para a utilização neste trabalho são: Unity (Unity Technologies, s.d.-b), Unreal Engine (Epic Games, s.d.-c) e Godot Game Engine (Linietsky & Manzur, s.d.).

A Unity já foi adotada anteriormente para o desenvolvimento e aplicação de *digital twins* em contextos variados (Lim et al., 2020), além de também ser amplamente utilizada para a produção de ferramentas de realidade virtual e interfaces homem-máquina por gigantes da indústria automotiva, como Volkswagen e Toyota (Edelstein, 2018; Unity Technologies, s.d.-a). Esta ferramenta é gratuita para uso não-comercial e conta com uma comunidade ativa de utilizadores e uma grande variedade de *plugins*, tanto pagos quanto gratuitos, criados por seus próprios usuários. Esta *engine* possui amplo suporte a gráficos 3D, sendo compatível com uma série de formatos de ficheiros de modelos tridimensionais. A Unity suporta a linguagem de programação C# de forma nativa, mas também é compatível com outras linguagens baseadas no *framework* .NET (Unity Technologies, s.d.-b).

A Unreal Engine é adotada por grandes empresas da indústria automotiva para apoio a *design* de automóveis em realidade virtual e para a elaboração de *showrooms* virtuais (Epic Games, s.d.-b). Além disto, esta ferramenta também é utilizada para visualização e avaliação de *design* em projetos de arquitetura (Epic Games, s.d.-a). Assim como a Unity, a Unreal Engine é gratuita para uso não-comercial e possui uma grande comunidade de usuários, embora não conte com uma variedade de *plugins* tão extenso em comparação com a Unity. Porém, diferentemente da Unity, a qual é baseada em código proprietário, a Unreal Engine disponibiliza seu código-fonte de forma aberta, possibilitando que os usuários realizem alterações conforme suas necessidades (contudo, por ser obrigatória a adesão a uma licença restritiva para que se tenha acesso ao código-fonte, a Unreal Engine não é considerada *open source*). Uma das maiores vantagens da Unreal Engine em relação a seus concorrentes é o suporte ao processamento de gráficos 3D extremamente sofisticados e realistas, sendo, por conta disto, uma das *game engines* mais utilizadas para o desenvolvimento de videogames de última geração (Game Rant, 2022). Em relação à programação, esta *engine* suporta a linguagem C++ de forma nativa, além de dispor também de uma linguagem de programação visual denominada *Blueprints* (Epic Games, s.d.-c).

Fora do contexto de desenvolvimento de videogames, a Godot Game Engine possui pouca adesão. Esta ferramenta é totalmente *open source*, o que a torna gratuita até mesmo para fins comerciais e permite a edição do seu código-fonte por qualquer usuário. Ela também conta com uma comunidade de usuários de tamanho significativo, embora não seja tão popular quanto a

Unity e a Unreal Engine. Por outro lado, a Godot Game Engine atualmente conta com suporte limitado à gráficos 3D, sendo geralmente utilizada para o desenvolvimento de videogames com gráficos bidimensionais (Wirtz, 2022). Esta *engine* possui suporte nativo às linguagens de programação C, C++ e C#, além de oferecer também duas linguagens próprias: VisualScript – uma linguagem de programação visual – e GDScript, uma linguagem baseada em Python e otimizada para a Godot Game Engine (Linietsky & Manzur, s.d.).

Após uma avaliação das três ferramentas, a Unity foi selecionada para o desenvolvimento do sistema proposto. Esta *game engine* foi escolhida por ser extremamente versátil, ter amplo suporte ao processamento de gráficos 3D e contar com uma variedade enorme de *plugins*, além de já ter sido utilizada para a construção de *digital twins* anteriormente.

3.5.2 Sistema de Gerenciamento de Base de Dados Relacional

O conceito de *digital twin* é fortemente baseado em dados, o que demanda a utilização de um sistema de gerenciamento de base de dados para armazenamento e manutenção das informações relevantes. Neste trabalho, decidiu-se utilizar uma base de dados relacional, por permitir uma maior organização e estruturação dos dados que serão acedidos pelos protótipos propostos. Foram considerados os seguintes sistemas de gerenciamento de base de dados relacional: MySQL (Oracle Corporation, s.d.-b), Oracle Database (Oracle Corporation, s.d.-a), Microsoft SQL Server (Microsoft Corporation, s.d.) e PostgreSQL (PostgreSQL Global Development Group, s.d.).

Os quatro sistemas considerados possuem suporte para a linguagem de programação *server-side* PHP, a qual será utilizada para realizar a ligação dos protótipos com as bases de dados. Esta linguagem foi selecionada para esta tarefa pois conta com suporte nativo para integração com bases de dados (The PHP Development Team, s.d.-b).

O sistema Oracle Database é empregado em uma grande variedade de indústrias em todo o planeta, incluindo as indústrias dos transportes, engenharia e saúde. Este sistema possui versões gratuitas para uso não-comercial (Oracle Corporation, s.d.-a). De modo semelhante, o Microsoft SQL Server também é adotado por empresas de diferentes setores e oferece uma versão gratuita para uso não-comercial (Microsoft Corporation, s.d.).

Tanto o sistema MySQL quanto o sistema PostgreSQL são software *open source* e podem ser utilizados e modificados sem nenhum custo. O MySQL, assim como seus concorrentes de código proprietário, é amplamente adotado em diferentes indústrias e é atualmente um dos sistemas de gerenciamento de base de dados relacional mais populares do mundo (Oracle Corporation, s.d.-b). O PostgreSQL também é um sistema muito popular, apesar de não ser tão usado quanto os outros sistemas apresentados anteriormente (Statista Research Department, 2022).

Embora os quatro sistemas citados sejam adequados para o projeto proposto, a linguagem PHP possui uma extensão para suporte nativo à conexão e interação com o sistema MySQL (The

PHP Development Team, s.d.-a). Por conta disto - e por tratar-se de um software *open source* - o MySQL foi o sistema selecionado para utilização no projeto proposto.

3.5.3 Software de Servidor *Web*

A facilidade de instalação e utilização de software de servidor *web open source*, além da grande quantidade de documentação disponível para estes tipos de software, torna-os ideais para utilização no projeto proposto. Por conta disto, foram considerados estes dois software: Apache HTTP Server (Apache Software Foundation, s.d.) e Nginx (Nginx Inc., s.d.). Além de serem totalmente *open source*, estes são também os dois software de servidor *web* mais utilizados em todo o mundo (Netcraft, s.d.).

Uma das maiores diferenças entre os dois software é a forma como eles gerenciam conexões ao servidor. O Apache HTTP Server realiza o gerenciamento de todas as conexões ao servidor de forma simultânea, o que pode causar problemas no serviço conforme o número de conexões aumenta. O Nginx foi desenvolvido para solucionar esta adversidade através do uso de um algoritmo de gerenciamento de conexões assíncrono. Por esta razão, o Nginx mostra-se mais eficiente em cenários onde há um grande número de conexões simultâneas ao servidor (Ellingwood, 2015).

Por outro lado, o Apache HTTP Server é um software mais flexível, pois conta com uma maior variedade de módulos que oferecem ao software novas funcionalidades. Além disso, por razão de sua enorme popularidade, o Apache HTTP Server dispõe de amplo suporte à integração com diversos tipos de software (Ellingwood, 2015).

O projeto proposto não contempla cenários de múltiplas conexões simultâneas ao servidor, já que o gerenciamento de conexões em servidores *web* não é o foco deste trabalho. Tendo isto em consideração, o Apache HTTP Server foi selecionado para o projeto por conta de sua flexibilidade, extensa disponibilidade de documentação e suporte generalizado à integração com variados gêneros de software.

3.5.4 Solução para Isolamento da Base de Dados e Servidor *Web*

O isolamento da base de dados e do servidor *web* pode ser realizado através da utilização de um *hypervisor* ou de containers de software. Foram consideradas três soluções: Docker (Docker Inc., s.d.-a), uma ferramenta de virtualização de software em containers; e dois *hypervisors*, o VirtualBox (Oracle Corporation, s.d.-c) e o VMware Workstation Player (VMware Inc., s.d.).

Embora desenvolvido e mantido pela Oracle Corporation, o VirtualBox é um *hypervisor* totalmente *open source*. Este software suporta uma grande quantidade de sistemas operacionais hóspedes para máquinas virtuais, incluindo diversas versões de Windows, Linux e OpenBSD. O VirtualBox possui uma comunidade ativa de desenvolvedores e ampla disponibilidade de documentação (Oracle Corporation, s.d.-c)

O VMware Workstation Player é uma versão gratuita para uso não-comercial do *hypervisor* VMware Workstation Pro. Apesar de algumas funcionalidades não estarem incluídas na versão gratuita, ambas as versões oferecem suporte ao processamento de gráficos 3D avançados, à criação de máquinas virtuais com alta capacidade de memória RAM e poder de processamento e à mais de duzentos sistemas operacionais hóspedes diferentes. Por estes motivos, o VMware Workstation Player permite a criação de máquinas virtuais mais robustas em comparação com o VirtualBox (VMware Inc., s.d.).

O software Docker, diferentemente de um *hypervisor*, realiza a virtualização de software à nível de sistema operacional, utilizando instâncias individuais de espaço de usuário denominadas containers. Cada instância contém uma aplicação e suas dependências e é totalmente isolada de outras instâncias e do restante do sistema operacional. Com isto, o Docker elimina a necessidade de instalação de sistemas operacionais hóspedes, o que resulta em uma performance mais eficiente e em uma menor utilização do espaço em disco, além de possibilitar a portabilidade entre diferentes plataformas (Docker Inc., s.d.-a).

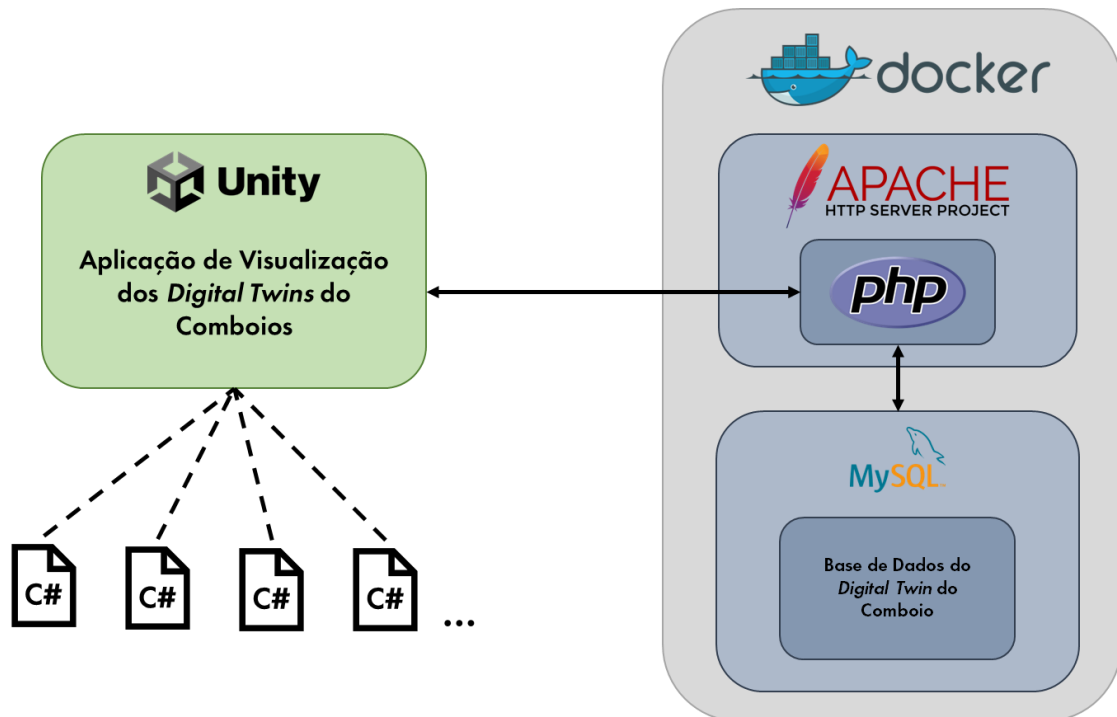
Por estes motivos, o Docker foi o software selecionado para realizar o isolamento do servidor *web* e da base de dados do projeto proposto.

4. Implementação

4.1 Arquitetura do Protótipo de *Digital Twin*

O protótipo desenvolvido é constituído por três componentes principais: uma aplicação móvel para visualização do *digital twin*, um servidor *web* e uma base de dados. A aplicação móvel foi desenvolvida através da *game engine* Unity e programada inteiramente na linguagem C#. O servidor *web* - implementado com o uso do software Apache HTTP Server – armazena os ficheiros PHP que realizam a ligação entre a aplicação móvel e a base de dados MySQL. O servidor *web* e a base de dados foram ambos instalados em containers criados com o software de virtualização Docker. A arquitetura do protótipo é apresentada pela Figura 6.

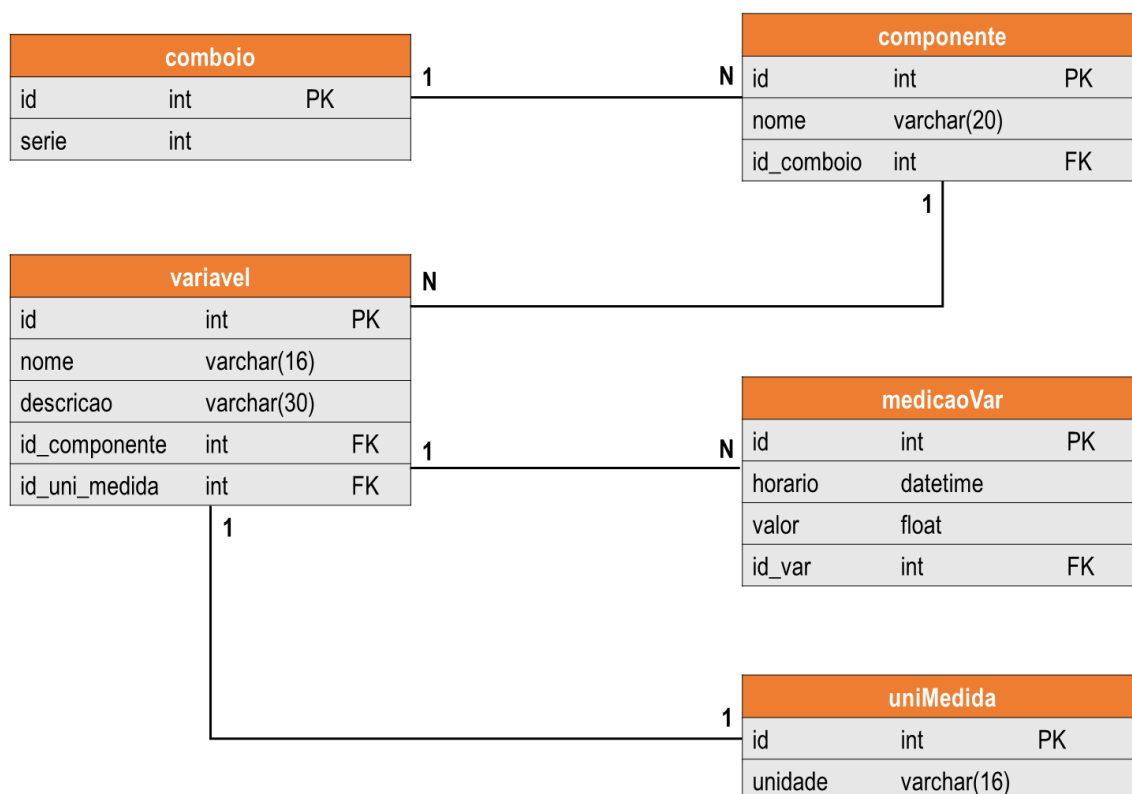
Figura 6: Arquitetura do Protótipo de *Digital Twin*



4.2 Base de Dados e Servidor *Web*

A construção da base de dados do *digital twin* foi baseada nas funcionalidades principais pensadas para a aplicação móvel, nomeadamente a seleção de comboios, componentes e variáveis por parte do usuário, além da exibição da evolução histórica da variável selecionada. Com isto, foram criadas tabelas relacionais para os dados dos comboios, componentes, variáveis e das medições relacionadas à estas variáveis. Ademais, foi construída uma tabela para as unidades de medida associadas às variáveis. O modelo de dados elaborado para o projeto é apresentado na Figura 7.

Figura 7: Modelo de dados do protótipo de *Digital Twin*



O servidor *web* do protótipo é encarregado por disponibilizar os ficheiros PHP à aplicação móvel a cada momento que a mesma realizar uma solicitação. Estes ficheiros, por sua vez, possuem a responsabilidade de buscar as informações requisitadas na base de dados e entregá-las à aplicação móvel. Foram criados cinco ficheiros PHP, responsáveis por, respetivamente, obter os dados referentes aos comboios, às componentes, às variáveis, às medições mais recentes das variáveis e ao histórico de medições das variáveis.

Tanto o servidor *web* (e os ficheiros PHP nele armazenados) quanto a base de dados foram separados do ambiente de desenvolvimento da aplicação móvel com a utilização do software Docker e implementados em um único *stack* tecnológico através da ferramenta Docker Compose. Esta ferramenta possibilita a criação de *stacks* de múltiplos containers, o que facilita o gerenciamento da comunicação entre as aplicações contidas nos diferentes containers (Docker Inc., s.d.-b).

4.3 Aplicação de Visualização dos *Digital Twins*

A aplicação móvel de visualização dos *digital twins* dos comboios hipotéticos foi desenvolvida para funcionamento com o sistema operacional *mobile* Android. A aplicação foi pensada para dispositivos móveis pois os mesmos oferecerem, em um cenário de utilização prática

real, maior liberdade e praticidade aos encarregados da monitoração do estado do veículo. O sistema operacional Android foi especificamente selecionado por ser amplamente utilizado em dispositivos móveis (Laricchia, 2022) e por possuir menos limitações aos processos de desenvolvimento e teste de software em comparação com outros sistemas operacionais *mobile*.

A interface gráfica da aplicação foi elaborada de forma a garantir que as informações sejam exibidas de maneira intuitiva e clara. A seleção do comboio a ser monitorado, assim como da variável a ser exibida, são feitas através de menus *dropdown*, os quais apresentam ao usuário uma lista das escolhas disponíveis. A seleção da componente do veículo cuja variável deseja-se verificar é feita diretamente no modelo tridimensional do comboio, através do toque do usuário na tela do dispositivo. De forma a possibilitar uma visualização mais próxima do mundo real, a interface gráfica permite ao usuário rotacionar o modelo do comboio no eixo Y, assim como aproximar ou afastar a visualização do modelo. Finalmente, a interface também oferece uma visão da evolução histórica das variáveis por meio de um gráfico de série temporal.

A Figura 8 apresenta um *mockup* da interface gráfica da aplicação, elaborado para auxiliar no desenvolvimento do software. Nota-se que, ao longo do processo de desenvolvimento, alguns elementos da interface foram alterados em relação ao *mockup* inicial. Todavia, a estrutura geral da interface permanece a mesma, assim como as funcionalidades descritas anteriormente. A interface final é apresentada mais à frente neste capítulo.

Figura 8: *Mockup* da interface gráfica da aplicação móvel



O modelo tridimensional do comboio utilizado na construção da aplicação foi obtido no website Sketchfab.com e elaborado pelo usuário timblewee (timblewee, 2021). Este modelo

encontra-se sob licença CC BY 4.0, a qual permite a livre utilização e adaptação do conteúdo, contanto que a autoria do criador original seja atribuída (Creative Commons, s.d.). Este modelo específico foi escolhido por representar as componentes de um comboio com um maior grau de detalhamento, o qual é um fator importante para a construção da interface da aplicação pois possibilita uma diferenciação clara entre as componentes do comboio.

Com o intuito de facilitar a seleção por toque, as componentes relevantes para o protótipo foram separadas do restante do modelo original de forma a criar uma vista “explodida” do veículo. A componente selecionada pelo usuário é exibida em destaque na interface através de um contorno de cor azul. Este efeito foi implementado com o uso de um *plugin* desenvolvido para Unity por Chris Nolet (Nolet, s.d.).

Decidiu-se pelo uso de menus *dropdown* para a escolha do comboio e da variável, pois este tipo de elemento possibilita a visualização de um grande número de opções por parte do usuário sem que a clareza e organização da interface sejam prejudicadas, já que é mostrada apenas a opção que está selecionada em um determinado momento.

A visualização do gráfico de evolução histórica da variável foi alterada em relação ao *mockup*, com o objetivo de torná-la mais clara e intuitiva. Em vez de ser apresentado por inteiro ao lado do modelo do comboio e dos demais elementos, o gráfico passou a ser exibido em *full screen* em uma janela individual posicionada por cima da interface principal, a qual é acedida através de um botão localizado abaixo dos dados das variáveis. Além disso, a seleção do intervalo de tempo para a visualização do histórico foi substituída pela navegação ao longo do gráfico. Ao tocar nos cantos esquerdo ou direito da tela, o usuário consegue navegar livremente pela evolução histórica da variável.

A interface gráfica final e a janela de visualização do gráfico de evolução histórica são apresentadas, respetivamente, nas Figuras 9 e 10.

Figura 9: Interface gráfica final da aplicação móvel

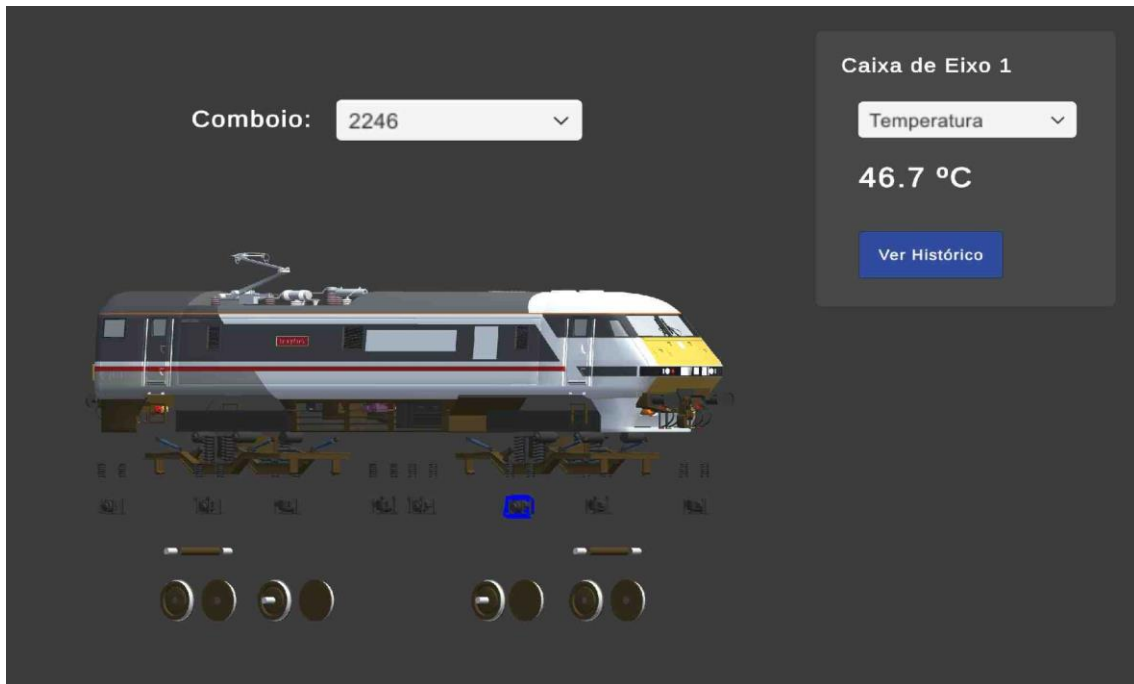
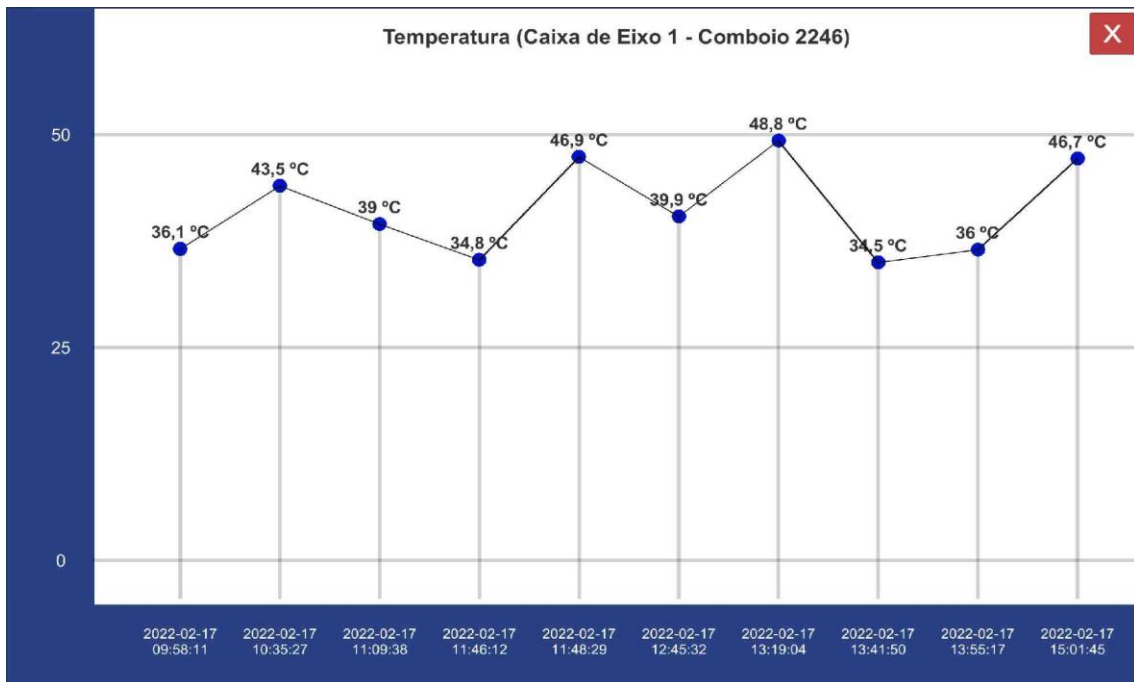


Figura 10: Janela de visualização do gráfico de evolução histórica da variável



5. Validação

A validação do trabalho realizado foi feita através de reuniões ao longo do desenvolvimento do protótipo e, também, por meio de um inquérito online de avaliação de qualidade enviado aos parceiros do projeto Ferrovia 4.0, o qual serviu como complemento às discussões levantadas nas reuniões. Este capítulo segue a seguinte estrutura: a seção 6.1 descreve o processo de formulação do inquérito e apresenta os itens definidos para o mesmo; a seção 6.2 detalha as respostas obtidas e promove uma breve discussão acerca dos resultados.

5.1 Elaboração do Inquérito

Decidiu-se formular os itens do inquérito com a utilização da escala Likert, a qual é uma técnica para medição das opiniões e posturas dos respondentes em relação a uma série de afirmações que representam juízos de valor. O respondente deve indicar sua postura em relação à cada afirmação em uma escala ascendente de concordância. Esta escala geralmente possui cinco valores, os quais são representados por números de 1 a 5 – ou, caso a escala possua uma quantidade de valores diferentes de cinco, por números de 1 a n, onde n simboliza o valor mais alto da escala (Göb et al., 2007).

Esta metodologia foi escolhida por ser amplamente empregada na construção de avaliações de usabilidade de software (Paz & Pow-Sang, 2016), além de ser a mais adequada para a medição das opiniões dos parceiros quanto à qualidade da interface gráfica da aplicação móvel e às potencialidades do protótipo como um todo.

O inquérito foi desenvolvido em formato digital¹ com o uso da ferramenta Google Forms e enviado aos parceiros através de correio eletrônico. Este método foi escolhido por tornar a comunicação com os parceiros mais fácil e rápida, pois permite aos mesmos responder ao inquérito em qualquer horário do dia.

Juntamente ao inquérito digital, foi também enviado um *hyperlink* para um vídeo de demonstração do protótipo de *digital twin* desenvolvido, ao qual os respondentes deveriam assistir

¹ O inquérito digital pode ser acessado através do seguinte *hyperlink*: https://bit.ly/inquerito_prot_dt

antes de enviarem suas respostas. Isto foi feito com o intuito de simplificar o processo de avaliação e evitar que os parceiros dependessem somente de documentos feitos ao longo do desenvolvimento do projeto para responder ao inquérito.

Para os itens do inquérito elaborado, foi utilizada uma escala Likert de cinco valores, os quais são representados pelos números 1 a 5 e interpretados, em ordem ascendente, como “discordo totalmente”, “discordo parcialmente”, “neutro”, “concordo parcialmente” e “concordo totalmente”. Foi incluído também um campo de texto para *feedback*, onde os respondentes poderiam, caso desejassem, descrever com maior clareza suas opiniões sobre o protótipo. Nota-se também que o inquérito foi formulado de maneira a ser respondido anonimamente. O inquérito elaborado pode ser consultado no apêndice 1.

5.2 Resultados

O inquérito foi enviado a 63 parceiros no total, dos quais 3 responderam. Embora o inquérito tenha sido respondido por cerca de 5% do total de pessoas às quais foi enviado, reitera-se que parte da validação do protótipo foi realizada em reuniões com os parceiros ao longo de todo o desenvolvimento do projeto. As discussões ocorridas nestas reuniões resultaram em alterações e aprimoramentos – tanto na definição dos requisitos quanto na implementação do protótipo – os quais já encontram-se integrados ao protótipo final apresentado neste projeto de dissertação.

As respostas referentes aos itens 1 a 5 e ao campo de *feedback* do inquérito são apresentadas, respectivamente, nas Tabelas 13 e 14.

Tabela 13: Respostas referentes aos itens 1 a 5 do inquérito

	Parceiro 1	Parceiro 2	Parceiro 3
Item 1	5	4	5
Item 2	5	4	4
Item 3	5	4	4
Item 4	4	5	5
Item 5	4	4	5

Tabela 14: Respostas referentes ao campo de feedback do inquérito

Parceiro	Feedback
Parceiro 1	-
Parceiro 2	No caso do ponto 3), faz falta um botão para ver os dados passados aqueles que estão a ser mostrados, ou seja, não mostrar apenas 10 dados ao longo do tempo mas sim mais. De resto, penso que a interface e todo o que a rodeia está no bom caminho e já mostro o essencial para um Digital Twin.
Parceiro 3	No ecrã principal, instante inicial aparece “Variáveis” e por baixo “variável”. Nos gráficos os pontos corresponderão a valor lidos, mas as linhas não são reais, assim devem ser a traço interrompido. Gostava de ter a possibilidade de fazer um click no componente do comboio que pretendo visualizar, não sei se é possível.

Ao analisar as respostas dos parceiros quanto aos itens 1 a 3, nota-se uma opinião, em geral, positiva em relação à interface gráfica da aplicação móvel, embora tenham sido levantadas questões referentes à clareza das informações e da navegação que ainda devem ser aprimoradas.

Quanto à interface principal da aplicação, foi mencionado que, no momento inicial da aplicação (quando não há comboios, componentes ou variáveis selecionadas), a interface exhibe textos *placeholder* nos menus *dropdown* e nas áreas onde os nomes da componente e da variável escolhida serão exibidos. Estes textos consistem em palavras como “Comboio”, “Nome da Componente” e “Variável”. Isto é um ponto que pode tornar a navegação menos intuitiva, já que cria confusão entre os usuários. A alteração do texto *placeholder* para frases explicativas – como “Selecione a variável” no lugar de “Variável” – poderiam ajudar a tornar a interface gráfica mais intuitiva.

Além deste ponto, um dos respondentes também comentou que gostaria de ter a possibilidade de “fazer um click” na componente do comboio que deseja analisar. Embora o significado do termo “fazer um click” não tenha ficado totalmente claro, entende-se que o respondente gostaria de selecionar a componente do comboio que pretende examinar diretamente no modelo 3D do veículo. Esta funcionalidade já existe e é essencial à interação com a aplicação, já que é a única forma de seleção das componentes. Nota-se, com isso, que a necessidade de interação direta com o modelo 3D do comboio para seleção da componente não está evidente à alguns utilizadores. A inclusão de um texto explicativo – como “Toque no comboio para selecionar a componente que deseja analisar” – poderia eliminar esta falha na interface.

Apesar de receber uma avaliação positiva dos respondentes, o gráfico de evolução histórica da variável também apresenta alguns pontos que necessitam ser aperfeiçoados. Foi mencionado que a forma de apresentação do gráfico não seria adequada pois são usadas linhas contínuas para ilustrar as variações nas medições. Estas linhas, segundo o *feedback* de um dos parceiros, não representam variações reais e, por conta disto, deveriam ser utilizadas linhas a traço interrompido. De facto, as variações de valor ilustradas no gráfico não correspondem à realidade, o que poderia gerar confusão entre os usuários e até mesmo resultar em equívocos na tomada de decisão, caso

o protótipo fosse empregado em operações ferroviárias reais. Como afirmado pelo respondente, o uso de linhas a traço interrompido seria o mais adequado.

Ainda sobre o gráfico de evolução histórica, comentou-se que seria útil a inclusão de um botão para visualização das medições anteriores àquelas exibidas no gráfico. A funcionalidade de navegação ao longo do gráfico já está implementada, e é realizada através do toque nos cantos direito e esquerdo da janela de visualização do gráfico. Contudo, pela ausência de botões ou indicadores visuais que alertem os utilizadores para a existência desta funcionalidade, a mesma pode passar despercebida. Esta falha poderia ser remediada com a simples adição de botões com setas que apontassem para a direita e esquerda, posicionados nos cantos direito e esquerdo do gráfico, respetivamente.

Por fim, as opiniões expressas pelos respondentes nos itens 4 e 5 apontam que o protótipo de *digital twin* desenvolvido demonstra potencial para suporte à monitoração de veículos ferroviários e à implementação da manutenção preventiva em um contexto da vida real. O *feedback* recebido indica que, apesar de serem necessárias algumas correções em relação à interface gráfica da aplicação móvel, o protótipo exhibe as características essenciais de um *digital twin*.

6. Conclusões e Trabalhos Futuros

Este trabalho de dissertação foi elaborado com o intuito de explorar o potencial do conceito de *digital twin* no apoio à operação de veículos ferroviários, nomeadamente no que tange à monitoração e à manutenção preventiva. Este objetivo foi atingido através do desenvolvimento de um protótipo de *digital twin* de um modelo genérico de veículo ferroviário, o qual proporcionou uma maior compreensão de como o conceito de *digital twin* pode oferecer uma visão mais completa e funcional das condições de componentes de um comboio durante o seu funcionamento. Também foi possível vislumbrar como este conceito oferece suporte à implementação dos processos de manutenção preventiva dos veículos, ao possibilitar a visualização da evolução histórica de vários indicadores referentes às componentes do veículo.

Embora o protótipo construído já permita enxergar o potencial do conceito de *digital twin* para o contexto dos transportes ferroviários, existem diversos aprimoramentos que podem ser implementados. Dentre eles, está a incorporação de funcionalidades de envio e exibição de avisos relacionados aos veículos e suas componentes, através da qual os usuários teriam a possibilidade de alertar os demais para potenciais defeitos ou irregularidades físicas nos comboios. Outra melhoria que poderia ser implementada é a recolha e exibição em tempo real de dados de localização dos veículos, por meio de sensores GPS. Desta forma, seria possível identificar o local exato de um comboio ao longo do seu trajeto, além de permitir a visualização posterior de informações acerca das viagens realizadas pelos veículos, como o tempo levado para completar determinado trajeto.

Os resultados obtidos por este estudo podem servir como inspiração para trabalhos futuros. Por exemplo, o conceito de *digital twin* pode ser aplicado à monitoração das condições físicas das vias férreas. Com a instalação de acelerómetros nos veículos ferroviários, é possível identificar, através da análise das medições obtidas, os trechos de uma via que apresentam degradação. Alternativamente, esta análise poderia ser feita de forma automatizada com o uso de algoritmos de inteligência artificial.

O trabalho desenvolvido pode também fomentar o interesse na exploração do potencial de outras tecnologias do paradigma da Indústria 4.0 – como a realidade aumentada e algoritmos de análise de *big data* e visão computacional – para o contexto dos serviços de transporte ferroviário.

Algumas destas tecnologias poderiam ser utilizadas, por exemplo, como apoio aos processos de manutenção das componentes dos comboios: fazendo uso de um aplicativo móvel, os operadores conseguiriam visualizar guias visuais – gerados por algoritmos de visão computacional – e instruções de manutenção em realidade aumentada.

7. Referências

- Ameri, F., & Sabbagh, R. (2016). Digital factories for capability modeling and visualization. In *IFIP Advances in Information and Communication Technology* (Vol. 488, pp. 69-78).
- Anwer, N., Ballu, A., & Mathieu, L. (2013). The skin model, a comprehensive geometric model for engineering design. *CIRP Annals*, 62(1), 143-146. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cirp.2013.03.078>
- Apache Software Foundation. (s.d.). *The Apache HTTP Server Project*. Retrieved February 16th, 2022 from <https://httpd.apache.org/>
- Bilberg, A., & Malik, A. A. (2019). Digital twin driven human–robot collaborative assembly [Article]. *CIRP Annals*, 68(1), 499-502. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2019.04.011>
- Boschert, S., & Rosen, R. (2016). Digital Twin—The Simulation Aspect. In P. Hehenberger & D. Bradley (Eds.), *Mechatronic Futures: Challenges and Solutions for Mechatronic Systems and their Designers* (pp. 59-74). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-32156-1_5
- Bottani, E., Assunta, C., Murino, T., & Vespoli, S. (2017). From the Cyber-Physical System to the Digital Twin: the process development for behaviour modelling of a Cyber Guided Vehicle in M2M logic.
- Canedo, A. (2016, 2-7 Oct. 2016). Industrial IoT lifecycle via digital twins. 2016 International Conference on Hardware/Software Codesign and System Synthesis (CODES+ISSS),
- Creative Commons. (s.d.). *Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)*. Retrieved April 28th, 2022 from <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>
- Defraeye, T., Tagliavini, G., Wu, W., Prawiranto, K., Schudel, S., Assefa Kerisima, M., Verboven, P., & Bühlmann, A. (2019). Digital twins probe into food cooling and biochemical quality changes for reducing losses in refrigerated supply chains. *Resources, Conservation and Recycling*, 149, 778-794. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.06.002>
- Dias-Ferreira, J., Ribeiro, L., Akillioglu, H., Neves, P., & Onori, M. (2018). BIOSOARM: a bio-inspired self-organising architecture for manufacturing cyber-physical shopfloors [Article]. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 29(7), 1659-1682. <https://doi.org/10.1007/s10845-016-1258-2>
- Docker Inc. (s.d.-a). *Empowering App Development for Developers | Docker*. Retrieved February 17th, 2022 from <https://www.docker.com/>
- Docker Inc. (s.d.-b). *Use Docker Compose*. Retrieved May 29th, 2022 from https://docs.docker.com/get-started/08_using_compose/
- Edelstein, S. (2018). *How gaming company Unity is driving automakers toward virtual reality*. Retrieved February 15th, 2022 from <https://www.digitaltrends.com/cars/unity-automotive-virtual-reality-and-hmi/>
- Ellingwood, J. (2015). *Apache vs Nginx: Practical Considerations*. Retrieved February 16th, 2022 from <https://www.digitalocean.com/community/tutorials/apache-vs-nginx-practical-considerations>
- Epic Games. (s.d.-a). *Architecture*. Retrieved February 15th, 2022 from <https://www.unrealengine.com/en-US/solutions/architecture>

- Epic Games. (s.d.-b). *Automotive & Transportation*. Retrieved February 15th, 2022 from <https://www.unrealengine.com/en-US/solutions/automotive-transportation>
- Epic Games. (s.d.-c). *Unreal Engine: The most powerful real-time 3D creation tool*. Retrieved February 15, 2022 from <https://www.unrealengine.com/en-US/>
- Game Rant. (2022). *All Games Confirmed To Be Using Unreal Engine 5 So Far*. Retrieved February 15th, 2022 from <https://gamerant.com/all-confirmed-unreal-engine-5-games/>
- Glaessgen, E. H., & Stargel, D. S. (2012). The digital twin paradigm for future NASA and U.S. Air force vehicles. Collection of Technical Papers - AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference,
- Göb, R., McCollin, C., & Ramalhoto, M. F. (2007). Ordinal methodology in the analysis of likert scales. *Quality and Quantity*, 41(5), 601-626. <https://doi.org/10.1007/s11135-007-9089-Z>
- Grieves, M. (2015). Digital Twin: Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication.
- Guo, D., Ling, S., Li, H., Ao, D., Zhang, T., Rong, Y., & Huang, G. Q. (2020, 20-21 Aug. 2020). A framework for personalized production based on digital twin, blockchain and additive manufacturing in the context of Industry 4.0. 2020 IEEE 16th International Conference on Automation Science and Engineering (CASE),
- Guo, J., Zhao, N., Sun, L., & Zhang, S. (2019). Modular based flexible digital twin for factory design [Article]. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 10(3), 1189-1200. <https://doi.org/10.1007/s12652-018-0953-6>
- Haag, S., & Anderl, R. (2018). Digital twin – Proof of concept. *Manufacturing Letters*, 15, 64-66. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2018.02.006>
- Henning, K., Wahlster, W., & Helbig, J. (2013). Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0. Berlin.
- Howard, D. A., Ma, Z., Aaslyng, J. M., & Jørgensen, B. N. (2020, 14-15 Oct. 2020). Data Architecture for Digital Twin of Commercial Greenhouse Production. 2020 RIVF International Conference on Computing and Communication Technologies (RIVF),
- Iglesias, D., Bunting, P., Esquembri, S., Hollocombe, J., Silburn, S., Vitton-Mea, L., Balboa, I., Huber, A., Matthews, G. F., Riccardo, V., Rimini, F., & Valcarcel, D. (2017). Digital twin applications for the JET divertor. *Fusion Engineering and Design*, 125, 71-76. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2017.10.012>
- Jeschke, S., & Grassmann, R. (2021). Development of a generic implementation strategy of digital twins in logistics systems under consideration of the german rail transport [Article]. *Applied Sciences (Switzerland)*, 11(21), Article 10289. <https://doi.org/10.3390/app112110289>
- Khajavi, S. H., Motlagh, N. H., Jaribion, A., Werner, L. C., & Holmström, J. (2019). Digital Twin: Vision, Benefits, Boundaries, and Creation for Buildings. *IEEE Access*, 7, 147406-147419. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2946515>
- Knapp, G. L., Mukherjee, T., Zuback, J. S., Wei, H. L., Palmer, T. A., De, A., & DebRoy, T. (2017). Building blocks for a digital twin of additive manufacturing. *Acta Materialia*, 135, 390-399. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.actamat.2017.06.039>
- Laricchia, F. (2022). *Mobile operating systems' market share worldwide from January 2012 to January 2022*. Retrieved April 12th, 2022 from <https://www.statista.com/statistics/272698/global-market-share-held-by-mobile-operating-systems-since-2009/>
- Liao, Y., Deschamps, F., Rocha Loures, E., & Ramos, L. (2017). Past, present and future of Industry 4.0 - a systematic literature review and research agenda proposal. *International Journal of Production Research*, 55. <https://doi.org/10.1080/00207543.2017.1308576>
- Lim, K. Y. H., Zheng, P., & Chen, C.-H. (2020). A state-of-the-art survey of Digital Twin: techniques, engineering product lifecycle management and business innovation perspectives. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 31(6), 1313-1337. <https://doi.org/10.1007/s10845-019-01512-w>
- Linietsky, J., & Manzur, A. (s.d.). *Godot Engine - Free and open source 2D and 3D game engine*. Retrieved February 15, 2022 from <https://godotengine.org/>

- Liu, J., Zhou, H., Tian, G., Liu, X., & Jing, X. (2019). Digital twin-based process reuse and evaluation approach for smart process planning [Article]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 100(5-8), 1619-1634. <https://doi.org/10.1007/s00170-018-2748-5>
- Lu, Y., Min, Q., Liu, Z., & Wang, Y. (2019). An IoT-enabled simulation approach for process planning and analysis: a case from engine re-manufacturing industry. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 32(4-5), 413-429. <https://doi.org/10.1080/0951192X.2019.1571237>
- Microsoft Corporation. (s.d.). *Microsoft Data Platform | Microsoft*. Retrieved February 16th, 2022 from <https://www.microsoft.com/en-us/sql-server>
- Netcraft. (s.d.). *December 2020 Web Server Survey*. Retrieved February 16th, 2022 from <https://news.netcraft.com/archives/2020/12/22/december-2020-web-server-survey.html>
- Nginx Inc. (s.d.). *Nginx News*. Retrieved February 16th, 2022 from <https://nginx.org/>
- Nolet, C. (s.d.). *Quick Outline*. Retrieved January 5th, 2022 from <https://assetstore.unity.com/packages/tools/particles-effects/quick-outline-115488#description>
- Oracle Corporation. (s.d.-a). *Database Services | Oracle*. Retrieved February 16th, 2022 from <https://www.oracle.com/database/>
- Oracle Corporation. (s.d.-b). *MySQL*. Retrieved February 16th, 2022 from <https://www.mysql.com/>
- Oracle Corporation. (s.d.-c). *Oracle VM VirtualBox*. Retrieved February 17th, 2022 from <https://www.virtualbox.org/>
- Paz, F., & Pow-Sang, J. (2016). A systematic mapping review of usability evaluation methods for software development process. *10*, 165-178. <https://doi.org/10.14257/ijseia.2016.10.1.16>
- Petković, T., Puljiz, D., Marković, I., & Hein, B. (2019). Human intention estimation based on hidden Markov model motion validation for safe flexible robotized warehouses. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 57, 182-196. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rcim.2018.11.004>
- PostgreSQL Global Development Group. (s.d.). *PostgreSQL: The world's most advanced open source database*. Retrieved February 16th, 2022 from <https://www.postgresql.org/>
- Projeto Ferrovia 4.0. (2019). *Anexo Técnico - Ferrovia 4.0*.
- Projeto Ferrovia 4.0. (s.d.). *Deliverable E1.1 - Caderno de Encargos do Sistema: PPS2 - Manutenção*.
- Qi, Q., Tao, F., Hu, T., Anwer, N., Liu, A., Wei, Y., Wang, L., & Nee, A. Y. C. (2021). Enabling technologies and tools for digital twin. *Journal of Manufacturing Systems*, 58, 3-21. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2019.10.001>
- Schleich, B., Anwer, N., Mathieu, L., & Wartzack, S. (2017). Shaping the digital twin for design and production engineering. *CIRP Annals*, 66(1), 141-144. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cirp.2017.04.040>
- Shrouf, F., Ordieres, J., & Miragliotta, G. (2014, 9-12 Dec. 2014). Smart factories in Industry 4.0: A review of the concept and of energy management approached in production based on the Internet of Things paradigm. 2014 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management,
- Söderberg, R., Wärmefjord, K., Carlson, J. S., & Lindkvist, L. (2017). Toward a Digital Twin for real-time geometry assurance in individualized production. *CIRP Annals*, 66(1), 137-140. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cirp.2017.04.038>
- Stark, J. (2015). *Product Lifecycle Management (Volume 1)* (3rd ed.). Springer, Cham. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-3-319-17440-2>
- Statista Research Department. (2022). *Most popular relational database management systems worldwide 2022*. Retrieved February 16th, 2022 from <https://www.statista.com/statistics/1131568/worldwide-popularity-ranking-relational-database-management-systems/>
- Tao, F., Sui, F., Liu, A., Qi, Q., Zhang, M., Song, B., Guo, Z., Lu, S., & Nee, A. (2018). Digital twin-driven product design framework. *International Journal of Production Research*, 57, 1-19. <https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1443229>

- Tao, F., Zhang, H., Liu, A., & Nee, A. Y. C. (2019). Digital Twin in Industry: State-of-the-Art. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 15(4), 2405-2415. <https://doi.org/10.1109/TII.2018.2873186>
- Tao, F., & Zhang, M. (2017). Digital Twin Shop-Floor: A New Shop-Floor Paradigm Towards Smart Manufacturing. *IEEE Access*, 5, 20418-20427. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2756069>
- The AnyLogic Company. (s.d.). *Alstom Develops a Rail Network Digital Twin for Railway Yard Design and Predictive Fleet Maintenance*. Retrieved May 26th, 2021 from <https://www.anylogic.com/digital-twin-of-rail-network-for-train-fleet-maintenance-decision-support/>
- The PHP Development Team. (s.d.-a). *MySQL Improved Extension*. Retrieved February 16th, 2022 from <https://www.php.net/manual/en/book.mysqli.php>
- The PHP Development Team. (s.d.-b). *PHP: Hypertext Preprocessor*. Retrieved February 16th, 2022 from <https://www.php.net/>
- timblewee. (2021). *Train - British Rail Class 91 Power Car*. Retrieved November 21st, 2021 from <https://sketchfab.com/3d-models/train-british-rail-class-91-power-car-c439eb088b944eec875b5b785056e1ea>
- Tuegel, E. J., Ingraffea, A. R., Eason, T. G., & Spottswood, S. M. (2011). Reengineering Aircraft Structural Life Prediction Using a Digital Twin. *International Journal of Aerospace Engineering*, 2011, 154798. <https://doi.org/10.1155/2011/154798>
- Unity Technologies. (s.d.-a). *Automotive, Transportation & Manufacturing*. Retrieved February 15th, 2022 from <https://unity.com/solutions/automotive-transportation-manufacturing>
- Unity Technologies. (s.d.-b). *Unity Real-Time Development Platform | 3D, 2D VR & AR Engine*. Retrieved February 15, 2022 from <https://unity.com/>
- Vachálek, J., Bartalský, L., Rovný, O., Šišmišová, D., Morháč, M., & Lokšík, M. (2017, 6-9 June 2017). The digital twin of an industrial production line within the industry 4.0 concept. 2017 21st International Conference on Process Control (PC),
- VMware Inc. (s.d.). *VMware Workstation Player*. Retrieved February 17th, 2022 from <https://www.vmware.com/products/workstation-player.html>
- Wang, X. V., & Wang, L. (2019). Digital twin-based WEEE recycling, recovery and remanufacturing in the background of Industry 4.0 [Article]. *International Journal of Production Research*, 57(12), 3892-3902. <https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1497819>
- Weyer, S., Meyer, T., Ohmer, M., Gorecky, D., & Zühlke, D. (2016). Future Modeling and Simulation of CPS-based Factories: an Example from the Automotive Industry. *IFAC-PapersOnLine*, 49(31), 97-102. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.12.168>
- Wirtz, B. (2022). *Unity vs. Godot: Performance, Community Support, Ease of Use, & Pricing*. Retrieved February 16th, 2022 from <https://www.gamedesigning.org/engines/unity-vs-godot/>
- Zhang, H., Liu, Q., Chen, X., Zhang, D., & Leng, J. (2017). A Digital Twin-Based Approach for Designing and Multi-Objective Optimization of Hollow Glass Production Line. *IEEE Access*, 5, 26901-26911. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2766453>
- Zheng, P., Lin, T.-J., Chen, C.-H., & Xu, X. (2018). A systematic design approach for service innovation of smart product-service systems. *Journal of Cleaner Production*, 201, 657-667. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.08.101>

8. Apêndices

8.1 Apêndice 1: Inquérito de Avaliação de Qualidade do Protótipo de *Digital Twin*

Avaliação de Qualidade - Protótipo de Digital Twin do Veículo

Este inquérito tem como objetivo avaliar a qualidade do protótipo de digital twin do veículo - desenvolvido no âmbito da Atividade 3 do PPS2 do projeto Ferrovia 4.0 - com base nas opiniões dos demais parceiros envolvidos no projeto.

As respostas obtidas também serão utilizadas como base para análise e discussão no contexto do trabalho de dissertação intitulado "O Conceito de Digital Twin como Ferramenta de Apoio à Operação de Veículos Ferroviários", elaborada por Lucas José Rocha, estudante do Mestrado em Multimédia e investigador científico da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

Para que possa realizar a sua avaliação, por favor assista um vídeo demo do protótipo com 2 minutos de duração, através do seguinte link: <https://docs.google.com/presentation/d/1vTaT6gfKAIGKvWRNvAB3Pn0U3K0Zu2kgRPG7bqV9W58/edit?usp=sharing>

***Obrigatório**

1. 1) A interface de usuário do protótipo é, de uma forma geral, intuitiva e de fácil interação. *

Marcar apenas uma oval.

	1	2	3	4	5	
Discordo Totalmente	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Concordo Totalmente

2. 2) Os dados das variáveis exibidos na página principal da interface são apresentados de forma clara e compreensível. *

Marcar apenas uma oval.

	1	2	3	4	5	
Discordo Totalmente	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Concordo Totalmente

3. 3) Os dados contidos no gráfico de evolução histórica são apresentados de forma clara e compreensível. *

Marcar apenas uma oval.

	1	2	3	4	5	
Discordo Totalmente	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Concordo Totalmente

4. 4) Se fosse empregado em um contexto da vida real, o protótipo desenvolvido seria útil para fins de apoio à monitoração das condições de veículos de transporte ferroviário. *

Marcar apenas uma oval.

	1	2	3	4	5	
Discordo Totalmente	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Concordo Totalmente

5. 5) Se fosse empregado em um contexto da vida real, o protótipo desenvolvido seria útil para fins de suporte à manutenção preventiva. *

Marcar apenas uma oval.

	1	2	3	4	5	
Discordo Totalmente	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Concordo Totalmente

6. 6) Feedback

Caso queira deixar algum comentário em relação ao protótipo, por favor escreva-o no campo abaixo:
