



INSTITUTO
UNIVERSITÁRIO
DE LISBOA

Integração de *Digital Twins* em Empresas Portuguesas: Identificação de Fatores Facilitadores, Barreiras e Resultados

Ana Catarina Ribeiro Lopes da Fonseca

Mestrado em Gestão

Orientador:

Professor Doutor Marco Leite, Professor Auxiliar Convidado, ISCTE Business School

janeiro, 2024

Departamento de Marketing, Operações e Gestão Geral

Integração de *Digital Twins* em Empresas Portuguesas: Identificação de Fatores Facilitadores, Barreiras e Resultados

Ana Catarina Ribeiro Lopes da Fonseca

Mestrado em Gestão

Orientador:

Professor Doutor Marco Leite, Professor Auxiliar Convidado, ISCTE Business School

janeiro, 2024

Agradecimentos

"I knew exactly what to do. But in a much more real sense, I had no idea what to do."

A elaboração desta dissertação não seria possível sem o acompanhamento e orientação do Professor Doutor Marco Leite, a quem agradeço encarecidamente por me guiar em momentos de incerteza e pelo seu incansável apoio.

Adicionalmente, gostaria de expressar a minha profunda gratidão aos cinco elementos de gestão das empresas entrevistadas, sem a participação dos quais não seria possível o desenvolvimento da presente investigação.

Aproveito ainda para agradecer à minha família, por ser o meu alicerce:

À minha Mãe, que sempre me mostrou a importância de aprender e que fez todos os possíveis para me proporcionar as melhores oportunidades de educação. Agradeço profundamente o seu apoio incondicional, a força que me transmite, e o facto de estar sempre presente não importa o quão longe nos encontremos.

Às minhas Avós Augusta e Emília, pelo exemplo de dedicação e determinação que representam, o qual me inspira diariamente a dar sempre o melhor de mim.

Ao Tomás, por ser não só o meu porto de abrigo, como o meu melhor amigo. Obrigada pela sua presença incondicional nos momentos bons e menos bons, por me mostrar como desistir nunca é uma opção e por me inspirar.

Ao Croque, que enche todos os meus dias de alegria.

Resumo

As tecnologias emergentes da Indústria 4.0 têm impactado a implementação da digitalização para o alcance de maior eficiência. Dada a complexidade associada a empresas industriais, é vital o desenvolvimento de capacidades de organização, estruturação e planeamento, o que enfatiza a necessidade de integrar soluções orientadas para a gestão do ciclo de vida do produto que facilitem a gestão dos fluxos de dados ao longo de todas as fases, garantindo rastreabilidade e consistência.

A integração dos *Digital Twins* assume um papel relevante como potencial solução para responder à necessidade supracitada, graças às suas capacidades para monitorização, simulação e otimização de processos. No presente estudo, é evidenciado o seu potencial de integração na gestão do ciclo de vida do produto, no qual se inclui o processo de manufatura.

Esta dissertação explora a integração dos *Digital Twins* em cinco empresas portuguesas dos setores de produção de equipamentos industriais e desenvolvimento de sistemas, identificando os fatores facilitadores, barreiras e resultados da integração. Para este objetivo, foi adotada uma metodologia de investigação qualitativa através da condução de entrevistas semiestruturadas.

Constata-se que a integração dos *Digital Twins* foi conseguida por três das cinco empresas estudadas, verificando-se nas restantes a integração como um objetivo incluído nas respetivas estratégias de digitalização. Adicionalmente, identificaram-se quais os fatores facilitadores para alcançar a integração, quais as barreiras encontradas e os resultados obtidos. Finalmente, conclui-se que, independentemente, da integração conseguida dos *Digital Twins*, a perceção quanto à sua eficácia para o desenvolvimento de capacidades converge para uma opinião, globalmente, positiva.

Palavras-chave: Indústria 4.0, Soluções de Digitalização, Integração de *Digital Twins*.

JEL: L00; O32.

Abstract

Emerging Industry 4.0 technologies have impacted the implementation of digitalization to achieve greater efficiency. Given the complexity associated with industrial companies, the development of organization, structuring and planning capabilities is vital, which emphasizes the need to integrate Product Lifecycle Management-oriented solutions that facilitate the management of data flows throughout all phases, ensuring traceability and consistency.

The integration of Digital Twins plays an important role as a potential solution to respond to the aforementioned need, thanks to its capabilities for monitoring, simulating and optimizing processes. In the present study, their potential for integration in the management of the product life cycle is highlighted, which includes the manufacturing process.

This dissertation explores the integration of Digital Twins in five Portuguese companies within the industrial equipment production and systems development sectors, identifying the enablers, barriers and outcomes of integration. To reach this objective, a qualitative research methodology was adopted by conducting semi-structured interviews.

It is ascertained that the integration of Digital Twins was achieved by three of the five companies studied, with the remaining companies including Digital Twins integration as an objective in their respective digitalization strategies. Additionally, the enablers for achieving integration, the barriers encountered and the outcomes obtained were identified. Finally, it is concluded that, regardless of achieving the integration of Digital Twins, the perception regarding their effectiveness for developing capabilities converges to an, overall, positive opinion.

Keywords: Industry 4.0, Digitalization solutions, Digital Twins Integration.

JEL: L00; O32.

Índice Geral

Índice de Quadros	vii
Índice de Abreviaturas	viii
1. Introdução	9
1.1. Contextualização e Definição do Problema.....	9
1.2. Questões e Objetivos da Investigação	10
1.3. Estrutura da Dissertação	10
2. Revisão de Literatura	12
2.1. Indústria 4.0	12
2.1.1. Conceito e Contexto Atual	12
2.1.2. Modelos de Avaliação, Fatores Facilitadores e Barreiras à Implementação	13
2.2. <i>Digital Twins</i>	15
2.2.1. Conceito	15
2.2.2. Características	16
2.2.3. Aplicações	17
2.3. <i>Digital Twins e Product Lifecycle Management</i>	18
2.3.1. Enquadramento	18
2.3.2. <i>Product Lifecycle Management</i>	19
2.3.3. Integração dos <i>Digital Twins</i> no <i>Product Lifecycle Management</i>	19
2.4. Integração dos <i>Digital Twins</i> no Processo de Manufatura	21
2.4.1. Enquadramento	21
2.4.2. <i>Digital Twins</i> como ferramenta para a simulação do processo de manufatura.....	22
2.4.3. <i>Digital Twins</i> como ferramenta para assegurar a geometria dos produtos manufaturados.....	23
2.4.4. <i>Digital Twins</i> como ferramenta para <i>smart manufacturing</i>	23
3. Metodologia	25
4. Apresentação e Discussão de Resultados	29
4.1. Empresa “A”	29
4.2. Empresa “B”	31
4.3. Empresa “C”	32
4.4. Empresa “D”	33
4.5. Empresa “E”	34
4.6. Opinião dos entrevistados sobre a eficácia da integração dos <i>Digital Twins</i> nos seus equipamentos para o desenvolvimento de capacidades	36
5. Conclusões, Limitações e Sugestões para Investigação Futura	40
5.1. Conclusões	40
5.2. Limitações e Sugestões para Investigação Futura	41
Referências Bibliográficas.....	43

Anexos	47
Anexo A - Guião para entrevista	47

Índice de Quadros

Quadro 3.1 – Questões propostas e respetivo enquadramento nos modelos de avaliação de maturidade na Indústria 4.0 elaborados por Lichblau et al. (2015) e Agca et al. (2017)..... 26

Quadro 4.1 – Respostas dos entrevistados à questão “Nos seus equipamentos, quão eficazes pensa que seriam/são os Digital Twins para desenvolver as seguintes capacidades?” 37

Índice de Abreviaturas

IA – Inteligência Artificial

IoT – *Internet of Things*

NASA – National Aeronautics and Space Administration

AFRL – Air Force Research Laboratory

PLM – *Product Lifecycle Management*

VDMA – Mechanical Engineering Industry Association

IMPULS – *Industrie 4.0 Readiness*

PME – Pequenas e Médias Empresas

ERP – *Enterprise Resource Planning*

R&D – Research & Development

IDI – Investigação, Desenvolvimento e Inovação

RGPD – Regime Geral de Proteção de Dados

CTIO – Diretor de Tecnologia e Inovação

KPI – *Key Performance Indicators*

1. Introdução

1.1. Contextualização e Definição do Problema

Encontramo-nos na era da Quarta Revolução Industrial, também conhecida por Indústria 4.0, patente no surgimento e evolução de tecnologias como a Inteligência Artificial (IA), *Cloud Computing*, *Internet of Things* (IoT) e *Digital Twins*. Estes últimos têm verificado um intenso desenvolvimento ao longo dos últimos anos, encontrando-se numa fase de rápido crescimento (Tao et al., 2019), e a sua presença em processos produtivos tem sido cada vez mais proeminente, permitindo maior eficiência e retorno económico (Negri et al., 2017).

A evolução tecnológica e as dinâmicas económicas globais tornam essencial que as empresas focadas no desenvolvimento de produtos e manufatura tenham a capacidade de gerir processos de inovação de forma eficiente, bem como de estar preparadas para fazer face a alterações e transformações com o menor impacto possível. Como tal, é vital o desenvolvimento de capacidades de organização, estruturação e planeamento, o que enfatiza a necessidade de integrar soluções orientadas para *Product Lifecycle Management* (PLM), *i.e.*, gestão do ciclo de vida do produto, que facilitem a gestão dos fluxos de informação e *data* ao longo de todas as suas fases, garantindo a rastreabilidade e consistência dos dados.

De acordo com a revisão de literatura apresentada neste projeto, é evidenciado o potencial da integração de *Digital Twins* na gestão de todo o ciclo de vida do produto, no qual se inclui, como uma das suas mais relevantes fases, o processo de manufatura, representando os *Digital Twins* uma solução para responder à necessidade supracitada.

Sendo esta uma solução tecnológica recente, nomeadamente no que concerne à sua integração em processos de manufatura (Negri et al., 2017), a utilização dos *Digital Twins* por parte das empresas no tecido empresarial português é uma realidade desconhecida, não existindo conhecimento empírico sobre os fatores determinantes para a sua integração eficaz.

Em suma, dado o potencial da integração dos *Digital Twins* como uma tecnologia associada à monitorização, simulação e otimização de processos produtivos, e tendo por motivação a lacuna na literatura existente sobre a realidade da sua integração em Portugal, a presente dissertação incide no estudo da integração dos *Digital Twins* em empresas portuguesas inseridas nos setores de produção de equipamentos industriais e desenvolvimento de sistemas de automação, e consequente identificação de fatores facilitadores, barreiras e resultados da sua implementação.

1.2. Questões e Objetivos da Investigação

Através da elaboração da presente dissertação, pretende-se desenvolver conhecimento para a gestão empresarial sobre a integração de *Digital Twins* em empresas portuguesas inseridas nos setores de produção de equipamentos industriais e desenvolvimento de sistemas de automação, visando responder à lacuna existente na atual literatura e contribuindo para os seguintes objetivos:

- i) Averiguar se as empresas portuguesas enquadradas nos setores referidos já integram *Digital Twins* nos seus equipamentos e sistemas;
- ii) Identificar quais os fatores facilitadores da integração dos *Digital Twins* nos equipamentos e sistemas de empresas portuguesas;
- iii) Identificar quais as barreiras à integração dos *Digital Twins* nos equipamentos e sistemas de empresas portuguesas;
- iv) Identificar quais os resultados da integração dos *Digital Twins* nos equipamentos e sistemas de empresas portuguesas;
- v) Aferir de que modo são utilizados os dados obtidos através dos *Digital Twins* integrados nos equipamentos e sistemas de empresas portuguesas;
- vi) Analisar a perceção das empresas portuguesas quanto à eficácia da integração dos *Digital Twins* nos seus equipamentos para o desenvolvimento de capacidades.

1.3. Estrutura da Dissertação

Para ir ao encontro dos objetivos definidos, a estrutura da presente dissertação reparte-se nos seguintes capítulos:

- i) Capítulo I – Introdução, no qual é apresentada a contextualização e definição do problema, as questões e objetivos de investigação e a estrutura da dissertação;
- ii) Capítulo II – Revisão de Literatura, onde são explorados os temas inerentes ao problema de investigação, iniciando-se por uma definição do conceito de Indústria 4.0, onde os *Digital Twins* se inserem, e pela apresentação de modelos de avaliação de maturidade da Indústria 4.0, seguindo-se com um foco no desenvolvimento do conceito de *Digital Twins* e das suas respetivas características e âmbitos de aplicação, repartidos posteriormente pela sua integração no *Product Lifecycle Management* e em processos de manufatura;

iii) Capítulo III – Metodologia, no qual é explicado a metodologia aplicada para a prossecução dos objetivos de investigação e descritas as estratégias de recolha e de análise de dados;

iv) Capítulo IV – Apresentação e Discussão de Resultados, contemplando os resultados das entrevistas conduzidas às cinco empresas portuguesas que constituem a amostra do estudo, distribuídas respetivamente por cinco subcapítulos. Este capítulo inclui ainda um sexto subcapítulo no qual são analisadas as opiniões dos entrevistados sobre a eficácia da integração dos *Digital Twins* nos seus equipamentos para o desenvolvimento de capacidades; e, finalmente,

v) Capítulo V – Conclusões, onde se identificam as contribuições da investigação, limitações e sugestões para investigação futura.

2. Revisão de Literatura

2.1. Indústria 4.0

2.1.1. Conceito e Contexto Atual

Ao longo da história, a evolução da espécie humana tem sido marcada pela pesquisa, descoberta e introdução de tecnologias em busca de uma cada vez maior evolução e melhoria das condições de vida. Algumas destas grandes inovações tecnológicas, como a criação da máquina a vapor, descoberta da eletricidade ou a invenção do primeiro computador, foram de tal modo disruptivas que cunharam respetivamente a primeira, segunda e terceira revoluções industriais. O conceito de Indústria 4.0, na sequência do início da era da quarta revolução industrial, foi introduzido em 2011, na Alemanha, por uma equipa de cientistas, sendo definitivamente adotado em 2013 para designar uma iniciativa estratégica do governo alemão com vista a modernizar a indústria, assente na integração de sistemas, informação e tecnologias. Posteriormente, outros países apresentaram programas análogos, de entre os quais se inclui Portugal com o “Programa Indústria 4.0”.

A nova geração de fábricas – *smart factories* – baseia-se em diversas tecnologias com o objetivo de melhorar a eficiência e flexibilidade na utilização de recursos. De acordo com um relatório publicado pela McKinsey & Company, a conectividade entre os vários elementos das fábricas é assegurada pelo recurso à internet e serviços de computação em nuvem, *i.e.*, *Cloud Computing*; por sua vez, a recolha de dados torna-se mais acessível com os desenvolvimentos na computação, podendo ser alargada a fornecedores, clientes e parceiros na cadeia de valor, e a qualidade da informação pode ser melhorada com a integração de, *e.g.*, sensores; a informação recolhida pode ser analisada em tempo real juntamente com informação de outras áreas da empresa graças ao recurso a IA, *Machine Learning* e *Advanced Analytics*, que alavancam as possibilidades de gerar relatórios, ajustar a produção e criar modelos de previsão (Agrawal et al., 2020). É ainda expectável, para a realidade futura das *smart factories*, não só um aumento da automação, mas também melhorias na interação homem-máquina, por intermédio da utilização de equipamentos de realidade virtual ou aumentada e sistemas de produção ciberfísicos.

Dentro das tecnologias emergentes da Indústria 4.0, destacam-se os *Digital Twins*, os quais combinam várias soluções tecnológicas de modo a criar uma representação virtual de produtos, serviços, equipamentos de produção ou outros bens, capaz de adaptar de forma dinâmica as

suas características e gerar respostas. Esta representação virtual nada mais é do que um modelo alimentado por parâmetros, dados históricos e/ou informação recolhida por, *e.g.*, sensores, que recorre a algoritmos para identificar potenciais problemas e otimizar a produção, a manutenção e o planeamento. A partir do ponto 2.2, o conceito de *Digital Twins* é detalhado e aprofundadas todas as suas potencialidades de integração.

Importa salientar que, no tecido empresarial português, a implementação de medidas de digitalização registou uma tendência de aceleração até 2022, potencialmente influenciada pelo contexto pandémico. No entanto, de acordo com o relatório Estado da Nação 2023, 48% das empresas não recorrem a tecnologias digitais ou apresentam um nível baixo de digitalização, existindo um elevado potencial para a integração de tecnologias que pode levar as empresas portuguesas a alcançar novos níveis de eficiência que contribuem para o seu crescimento e, igualmente, para o crescimento do país (Sá et al., 2023).

2.1.2. Modelos de Avaliação, Fatores Facilitadores e Barreiras à Implementação

Face aos desafios da Indústria 4.0, as empresas são confrontadas com novas possibilidades de utilização e desenvolvimento das suas capacidades e recursos. Assim, assume uma crescente relevância a avaliação destes elementos, sendo possível recorrer a modelos de maturidade para esse fim (Becker et al., 2009). Os modelos de maturidade oferecem a possibilidade de as empresas identificarem qual o seu atual nível de maturidade, revelando quais os possíveis passos de melhoria que podem tomar para alcançar um nível pretendido (Poeppelbuss et al., 2011).

No âmbito da iniciativa *Industrie 4.0* e da parceria desenvolvida conjuntamente com a Mechanical Engineering Industry Association (VDMA), é proposto um modelo de avaliação do nível de preparação das empresas relativo ao enquadramento no conceito de Indústria 4.0 denominado IMPULS – *Industrie 4.0 Readiness* (IMPULS). Este modelo assenta no princípio de que a Indústria 4.0 corresponde à fusão entre o mundo físico e o mundo virtual, sendo a digitalização o ponto de ligação entre ambos os mundos (Lichblau et al., 2015).

Para avaliar o nível de maturidade de uma empresa de acordo com o modelo IMPULS, seis dimensões são avaliadas – estratégia e organização; fábricas inteligentes; operações inteligentes; produtos inteligentes; serviços *data-driven*; e, colaboradores. Uma das principais limitações deste modelo corresponde ao facto de possivelmente subavaliar pequenas e médias empresas (PME), pois contempla sub-dimensões que podem representar um maior desafio para as mesmas devido à sua menor dimensão (Mittal et al., 2018).

Um outro modelo de maturidade é proposto por Agca et al. (2017), denominado *An Industry 4 Readiness Assessment Tool*. Apresenta como finalidade a avaliação das empresas quanto à sua preparação para os desafios da Indústria 4.0, através da mensuração de seis diferentes dimensões – produtos e serviços, produção e operações, estratégia e organização, cadeia de abastecimento, modelo de negócio e considerações legais (Agca et al., 2017). Este modelo apresenta como principal limitação o facto de, paralelamente ao modelo IMPULS, mensurar sub-dimensões potencialmente irrelevantes para PME (Axmann et al., 2020), nomeadamente as contidas na dimensão relativa a considerações legais.

Importa enfatizar que, por outro lado, em comparação com o modelo IMPULS, o modelo proposto por Agca et al., (2017) destaca-se pelo facto de contemplar uma dimensão referente ao modelo de negócio. Este fator assume uma particular importância uma vez que a Indústria 4.0 apresenta desafios que podem motivar a adaptação ou redefinição do modelo de negócio utilizado pelas empresas, como disso é exemplo a transmutação de negócios físicos para e-commerce.

Perante as diferentes possíveis dimensões para a avaliação de maturidade das empresas na Indústria 4.0, são revelados quais os recursos e capacidades que se destacam nas empresas em termos de integração para o alcance dos objetivos de digitalização, tal como quais são as dificuldades encontradas. Assim, torna-se possível distinguir fatores que influenciam a capacidade de as empresas implementarem tecnologias emergentes da quarta revolução industrial.

Os *Digital Twins*, enquanto tecnologia emergente da Indústria 4.0, são uma das possíveis soluções de digitalização a implementar pelas empresas. Como tal, são passíveis da influência de diversos fatores aquando da sua integração. Um estudo conduzido por Neto et al. (2020) identificou a existência de fatores designados por:

- i) Facilitadores, ou *enablers*, que correspondem aos fatores que permitem a implementação dos *Digital Twins*;
- ii) Barreiras, ou *barriers*, que correspondem aos fatores que impossibilitam a implementação dos *Digital Twins* e que impedem o desenvolvimento de projetos com estes relacionados.

2.2. *Digital Twins*

2.2.1. Conceito

O modelo conceptual dos *Digital Twins* foi introduzido por Michael Grieves em 2003, no curso executivo por si lecionado sobre PLM na Universidade do Michigan. Apesar de, na altura, esta ideia ainda não ser denominada por *Digital Twins*, o seu modelo conceptual foi descrito como sendo constituído por três partes – a) os produtos físicos no espaço real, b) os produtos virtuais no espaço virtual, e c) as ligações de *data* e informação que conectam os produtos virtuais e reais num só (Grieves, 2015). Hoje, este corresponde a um dos conceitos mais reconhecidos e a um dos modelos mais amplamente aplicados dos *Digital Twins* (Qi et al., 2021).

Nesse período, a maior parte da informação sobre produtos físicos era ainda retida manualmente, sob o formato de papel. O conceito proposto por Grieves (2015) enfatizava a necessidade de existir uma ligação sincronizada entre a *data* relativa ao produto físico e ao produto virtual. Efetivamente, a tecnologia de informação usada no desenvolvimento e manutenção de produtos, assim como no *design* e manufatura de produtos físicos, evoluiu drasticamente desde este conceito inicial, permitindo acompanhar todas as fases do ciclo de vida de um sistema – criação, manufatura, operação e eliminação (Grieves & Vickers, 2017).

Adicionalmente, um dos conceitos mais amplamente reconhecidos corresponde ao proposto por Glaessgen & Stargel (2012) aquando da apresentação da primeira proposta de aplicação prática dos *Digital Twins*, desenvolvida pela National Aeronautics and Space Administration (NASA) e pela Air Force Research Laboratory (AFRL), na qual descrevem *Digital Twins* como uma simulação multifísica, multiescala e probabilística integrada de um sistema, que usa os melhores modelos físicos disponíveis, atualizações provenientes de sensores, entre outros, para espelhar a vida do seu gémeo correspondente.

No âmbito da intensa evolução tecnológica que tem ocorrido na era da Indústria 4.0, o conceito de *Digital Twins* tem sido desenvolvido para incluir a ideia de recorrer a uma cópia digital de um sistema físico de forma a otimizá-lo em tempo real, sendo a simulação e a transferência de *data* entre diferentes fases do ciclo de vida características inerentes (Söderberg et al., 2017). Söderberg et al. (2017) relacionam este conceito com o surgimento e evolução de IoT, enfatizando a necessidade do desenvolvimento de ferramentas como os *Digital Twins* para converter as elevadas quantidades de dados hoje disponíveis em informação útil e com potencial real.

Por sua vez, dada a integração deste conceito em indústrias como a manufatura, para Schützer et al. (2019) o conceito de *Digital Twins* remete para a representação virtual de um sistema real, como por exemplo um sistema de produção, que contém toda a informação sobre esse sistema, bem como a *data* que conecta o sistema real ao virtual e a informação que conecta o sistema virtual ao real. Graças à ligação de dados entre sistemas, um *Digital Twin* que representa um modelo virtual do sistema real é criado, existindo fluxos de comunicação entre ambos durante todo o seu ciclo de vida, indo de encontro ao conceito apresentado por Grieves & Vickers (2017).

Reconhecidas empresas, como a Siemens, já oferecem soluções baseadas em *Digital Twins*, como o *software* Siemens PLM, e definem os *Digital Twins* como um duplo virtual de um produto, máquina, processo ou de uma fábrica que contém toda a sua *data* e que permite a sua conceção, simulação e manufatura de modo mais rápido e com uma perspetiva assente em melhorar aspetos económicos, ambientais, de *performance* e robustez. Enfatizam ainda que os *Digital Twins* podem acompanhar um produto durante todas as fases da sua cadeia de valor, desde a sua conceptualização, manufatura, operação até à sua reciclagem (Lo et al., 2021).

2.2.2. Características

De acordo com Tao et al. (2018), com base no conceito de *Digital Twins* proposto por Glaessgen & Stargel (2012), é possível identificar três das suas características principais:

i) A capacidade de refletir informação em tempo real, uma vez que nos *Digital Twins* coexistem dois espaços – o espaço virtual, que é o espelho do espaço físico e que mantém uma sincronização contínua com este;

ii) Capacidade de interação e convergência, pois a *data* contida dentro do *Digital Twin* depende dos dados que são obtidos em tempo real dos sistemas aos quais está conectado, mas também em parte do conhecimento de especialistas para interpretá-los, e é através da convergência entre ambos que se torna possível extrair a máxima informação possível. Adicionalmente, os espaços físico e virtual estão sincronizados, o que permite a sua constante interação e a geração de um fluxo único de *data*;

iii) Capacidade de evolução autónoma, dado que através da sincronização entre os espaços físico e virtual, o *Digital Twin* recebe atualizações de *data* em tempo real, estabelecendo comparações entre ambos que permitem melhorar os modelos digitais.

Boschert & Rosen (2016) distinguem ainda as seguintes características:

iv) Capacidade de integrar diferentes tipos de dados do sistema físico e de mapeá-los de forma fiável;

v) Capacidade de existir ao longo de todo o ciclo de vida do sistema físico e de evoluir paralelamente a este, acumulando conhecimento relativo ao mesmo;

vi) Capacidade de otimizar o sistema físico com base no seu modelo digital.

Grieves (2015), no *whitepaper* em que introduziu o modelo conceptual de *Digital Twins*, enunciou que estes têm a capacidade de apoiar três das mais poderosas ferramentas do conhecimento humano para a resolução de problemas e para a inovação: a conceptualização, por permitirem observar, em simultâneo, o progresso de um produto físico ao longo do processo produtivo, a informação relativa aos parâmetros atribuídos e aos parâmetros que efetivamente nele constam; a comparação, pois é possível aferir, em tempo real, os parâmetros que foram designados como ideais e se a produção está a cumpri-los; e, finalmente, a colaboração, pois possibilita que um extenso número de pessoas, localizadas nos mais variados pontos geográficos, visualizem de igual forma um produto físico nas diferentes fases do processo produtivo, e é possível partilhar esta capacidade entre as várias fábricas envolvidas.

2.2.3. Aplicações

A recente integração de *Digital Twins* na manufatura (Negri et al., 2017) mostra que esta tecnologia possibilita a simulação, otimização e visualização detalhada de todo um processo de produção, desde a manufatura de componentes individuais até à montagem completa de um produto (Kritzinger et al., 2018), o que reforça a possibilidade de integração de *Digital Twins* na gestão completa do ciclo de vida de um produto, como será mais profundamente analisado no ponto 2.3, e respetivamente numa das fases mais fulcrais que este ciclo engloba – a manufatura – como analisado no ponto 2.4.

É unânime, na literatura existente, o reconhecimento do potencial da aplicação dos *Digital Twins* para melhorar a competitividade, produtividade e eficiência no processo de manufatura. Rosen et al. (2015) enfatizam que esta integração é benéfica no planeamento de produção e respetivo controlo, ao permitir combinar dados reais com modelos de simulação e, deste modo, obter previsões fiáveis para apoiar na tomada de decisão, bem como na automatização do planeamento e execução de encomendas. Uhlemann et al. (2017) reconhecem o potencial no planeamento do *layout* de produção, devido à capacidade de sincronização e consequente avaliação contínua do sistema de produção.

Atualmente, empresas mundialmente reconhecidas como a Maserati, fabricante italiana de automóveis de luxo, já empregam *Digital Twins* no desenvolvimento de automóveis, sendo disso exemplo o modelo Maserati Ghibli. A empresa recorreu ao *software* Siemens PLM para desenvolver o modelo *Digital Twin* deste automóvel, o que possibilitou efetuar simulações virtuais dos seus protótipos, *test drives* e testes de túnel de vento e, assim, reduzir acentuadamente os custos associados a estes procedimentos e reduzir o tempo de desenvolvimento em 30% (Eureka Magazine, 2017).

Por sua vez, a Tesla, empresa americana que desenvolve, fabrica e comercializa veículos elétricos e soluções energéticas, desenvolve para cada carro o correspondente *Digital Twin* (Industry Week, 2020). Esta abordagem permite sincronizar a transmissão de *data* entre os carros e a fábrica e, através do recurso a IA, interpretar os dados para detetar possíveis falhas no funcionamento dos veículos e as suas necessidades de manutenção (Schleich et al., 2017).

2.3. *Digital Twins* e *Product Lifecycle Management*

2.3.1. Enquadramento

PLM, *i.e.*, gestão do ciclo de vida do produto, corresponde à atividade de negócio de gerir produtos ao longo de todo o seu ciclo de vida, representando assim uma importante ferramenta para aumentar lucros através da inovação (Tao et al., 2018).

O desenvolvimento de novos produtos, que compreende as fases de conceptualização, análise de mercado, *design*, desenvolvimento e testagem (Ulrich & Eppinger, 2016) é um processo que pode beneficiar da integração dos *Digital Twins* para melhorar as suas diferentes etapas (Lo et al., 2021).

De facto, é unânime que a integração de *Digital Twins* no desenvolvimento de produtos pode trazer vantagens como reduzir o tempo de desenvolvimento, a necessidade de testes físicos e custos inerentes através da possibilidade de criar protótipos e simulações virtuais, correspondendo a uma ferramenta útil de apoio para a tomada de decisão (Jiao et al., 2007; Negri et al., 2017).

Para conseguir obter todo o potencial dos *Digital Twins*, é necessário que estes sejam integrados em todas as fases do ciclo de vida de um produto, dentro das quais se inclui a fase de manufatura, possibilitando o desenvolvimento de um modelo digital consistente e perfeitamente alinhado com o que sucede na realidade (Schützer et al., 2019).

Grieves & Vickers (2017) recorrem ao conceito de sistema, *i.e.*, dois ou mais componentes unidos para produzir, com base em um ou mais *inputs*, um ou mais resultados que não seriam possíveis obter através de componentes individuais, para enfatizar a importância da integração de *Digital Twins* ao longo do ciclo de vida de um produto.

2.3.2. Product Lifecycle Management

Os sistemas são progressivamente desenvolvidos, passando pelas diferentes fases observadas no ciclo de vida de um produto. Deste modo, o ciclo de vida de um sistema inicia-se no momento da sua criação, fase na qual são definidas as suas características e comportamentos desejados, *i.e.*, os seus requisitos (Schützer et al., 2019). É enfatizada a necessidade de já nesta fase inicial ter em consideração os fatores subjacentes à capacidade de manufatura, sustentabilidade, suporte e eliminação do sistema (Grieves & Vickers, 2017).

Seguidamente, transita-se para a fase de manufatura (também denominada por fase de produção) do sistema, na qual este surge fisicamente. Como tal, constata-se nesta fase se as técnicas de manufatura disponíveis são suficientes para tornar o *design* do sistema concretizável, o que pode despoletar o surgimento de comportamentos indesejáveis do sistema na medida em que este é modificado para ir de encontro à capacidade de manufatura existente (Grieves & Vickers, 2017).

Após esta fase, caso o sistema vá ao encontro de todos os requisitos definidos na fase de criação, é alcançada a fase operacional, onde se verificam todos os comportamentos do sistema em ação. Deste modo, esta fase permite identificar comportamentos indesejáveis do sistema que não estavam previstos, constituindo este um passo de extrema relevância para garantir a viabilidade do sistema. Finalmente, a última fase do ciclo de vida do sistema remete para a sua eliminação (Grieves & Vickers, 2017).

2.3.3. Integração dos *Digital Twins* no Product Lifecycle Management

O conceito de *Digital Twins* é enquadrado na gestão do ciclo de vida do produto como sendo uma componente de informação digital que reflete toda a informação contida num sistema físico ao estar conectado a este ao longo de todo o seu ciclo de vida (Grieves & Vickers, 2017). Deste modo, a componente física do sistema e a sua componente virtual estão conectadas enquanto o sistema transita entre as quatro fases do seu ciclo de vida (criação, manufatura, operação e

eliminação), o que remete para a capacidade de os *Digital Twins* serem um modelo dinâmico que acompanha e sofre alterações ao longo do ciclo de vida de um sistema.

Paralelamente ao ciclo de vida do sistema físico, na fase de criação de um *Digital Twin* este é concebido virtualmente como um protótipo que, graças à evolução tecnológica observada ao longo dos últimos anos, é possível desenhar em três dimensões (3D). Este facto possibilita identificar problemas no *design* e simular o sistema sob diferentes condições ambientais, submetendo-o a testes, de forma rápida e com reduzidos custos na medida em que ocorre digitalmente, antes da sua produção física. Como tal, a fase de criação do sistema em paralelo com a do *Digital Twin* possibilita de imediato validar o alcance dos requisitos pretendidos e eliminar problemas indesejáveis previstos, bem como os imprevistos através da variação dos parâmetros de simulação (Grieves & Vickers, 2017; Schützer et al., 2019).

Mediante a finalização e consequente validação do modelo digital, é usada a sua informação para criar o sistema físico na fase de manufatura (*i.e.*, produção). Nesta fase, os sistemas físicos são construídos e as suas configurações são guardadas em simultâneo no *Digital Twin* através da transmissão de *data*. Sendo a fase de manufatura uma das etapas fundamentais do desenvolvimento de produtos, é necessário que todos os recursos de manufatura estejam conectados ao *Digital Twin* para ocorrer uma transmissão de *data* fluida (Schützer et al., 2019). Assim, é possível manter o conhecimento das especificações dos sistemas sem ter de recorrer à sua forma física, sendo originada uma representação digital exata do sistema físico (Grieves & Vickers, 2017).

Seguidamente, é alcançada a fase de operação, onde se confirma se as previsões comportamentais do sistema são efetivamente observadas, enquanto se mantém a ligação entre o sistema físico e o *Digital Twin*. Esta fase é relevante para verificar se o modelo e a sua respetiva simulação, realizados na fase de criação, foram eficazes em eliminar comportamentos indesejados previstos e a evitar comportamentos indesejados imprevistos (Grieves & Vickers, 2017), o que permite reduzir significativamente os custos associados ao desenvolvimento do sistema. Uma vez que os sistemas físico e digital estão conectados por fluxos de *data* bidirecionais, qualquer alteração que ocorra no sistema físico, como a substituição de componentes, é refletida no *Digital Twin*, permitindo determinar em qualquer momento as configurações de cada sistema. Deste modo, a informação virtual pode ser usada para prever potenciais falhas no sistema físico, o que pode ser ainda útil para a manutenção preditiva (Schützer et al., 2019).

Por fim, a fase final do ciclo de vida, que remete para a eliminação do sistema, ganha uma nova importância graças ao *Digital Twin*, pois este permite armazenar conhecimento sobre o

sistema mesmo após este deixar de existir, que poderá ser utilizado na produção de futuras versões deste e, assim, evitar que ocorram problemas anteriormente observados. Adicionalmente, de acordo com Grieves & Vickers (2017), o *Digital Twin* permite armazenar informações relativas ao *design* e materiais que compõem o sistema, o que é essencial para saber como corretamente eliminá-lo com o menor impacto ambiental possível.

Em suma, é sublinhada a importância de aliar *Digital Twins* a sistemas físicos na medida em que possibilitam desenhar, testar, manufaturar e usar as versões virtuais de sistemas em vez de apenas ter acesso a informações relevantes após a sua produção física, permitindo poupar tempo, evitar custos e potenciais consequências indesejadas aos seus utilizadores (Grieves & Vickers, 2017). Adicionalmente, através da capacidade em manter a permanente sincronização entre ambos os sistemas, todas as alterações que ocorram no sistema físico são automaticamente captadas no sistema digital, permitindo em qualquer momento conhecer as configurações do sistema e, consequentemente, realizar simulações para prever falhas e comportamentos no sistema físico.

2.4. Integração dos *Digital Twins* no Processo de Manufatura

2.4.1. Enquadramento

De acordo com Tao et al. (2018), o processo de manufatura é composto por três fases fundamentais:

- i) Em primeiro lugar, a fase de gestão de recursos, na qual os materiais, máquinas, ferramentas e mão-de-obra são alocados de acordo com as características do produto que é pretendido produzir;
- ii) Seguidamente, a fase de planeamento de produção, na qual são identificadas as necessidades de maquinaria, montagem e logística, entre outros, de modo a alcançar os objetivos pretendidos em termos financeiros, temporais e de qualidade; e, por último,
- iii) A fase de execução, na qual é vital a monitorização e controlo do processo produtivo, com enfoque no controlo da produção em tempo real, calendarização da produção, armazenamento dos materiais e controlo de qualidade, para assegurar a eficiência e estabilidade do processo de manufatura.

De modo a ser possível alcançar a máxima eficiência possível, é pretendida a otimização da gestão dos recursos e evitar divergências entre o planeamento de produção e a fase de execução, o que torna necessária a existência de fluxos de *data* entre as diferentes fases do

processo de manufatura (Tao et al., 2018). Assim, a integração de *Digital Twins* no processo de manufatura afigura-se como uma solução eficaz para alcançar neste a máxima eficiência possível, sendo analisadas de seguida as suas potenciais aplicações.

2.4.2. *Digital Twins* como ferramenta para a simulação do processo de manufatura

De acordo com Grieves (2015), aquando da publicação do *whitepaper* no qual introduziu o modelo conceptual, a utilização de *Digital Twins* permite a potencial visualização simultânea e consequente comparação entre o produto físico e virtual, o que se traduz em “grandes benefícios, especialmente na fase de manufatura do produto”. De facto, é da sua opinião que os *Digital Twins*, ao juntarem num só modelo a informação relativa a como o produto virtual é manufaturado e a informação sobre como o processo de manufatura do produto físico está a decorrer, oferecem uma perspetiva simultânea e em tempo real sobre como o produto manufaturado está a alcançar ou não os parâmetros de produção definidos.

Deste modo, os *Digital Twins* são vistos como uma inovação que abre novas portas ao processo de simulação na manufatura (Grieves, 2015; Rosen et al., 2015), ao desempenharem a função de réplicas digitais de fábricas que permitem observar como um produto está a ser manufaturado em tempo real e, adicionalmente, permitirem que qualquer pessoa observe o processo produtivo de uma fábrica a partir de qualquer lugar, facilitando a conceptualização, comparação e colaboração entre as diferentes partes interessadas dentro de uma empresa e ao longo de toda a cadeia de abastecimento (Grieves, 2015; Kriztinger et al., 2018).

Söderberg et al. (2017) referem que os *Digital Twins* beneficiam dos avanços tecnológicos que têm ocorrido ao longo dos últimos anos, que permitem a conexão ao longo das diferentes fases da cadeia de valor de sensores, máquinas, peças e de sistemas de IT num só, permitindo a sua interação e recurso a *data* para, através da simulação, prever falhas, adaptarem-se a alterações e sofrerem configurações. De facto, a evolução tecnológica subjacente à Indústria 4.0 estimulou a possibilidade de obter elevadas quantidades de *data*, o que torna possível não só visualizar o produto virtualmente, como testar as suas capacidades de *performance*, simular as operações que constituem o processo de manufatura em que ele é concebido (Grieves, 2015) e otimizar em tempo real o processo de manufatura (Söderberg et al., 2017).

O recurso a sensores, por exemplo, torna possível reaproveitar modelos de simulação criados na fase de desenvolvimento de produtos na fase de manufatura, aproveitando dados reais para simular virtualmente sobre estes as alterações a fazer no próximo produto e permitindo assim ajustar as definições do equipamento de manufatura para a sua produção. Este

facto permite melhorar a qualidade dos produtos manufaturados, bem como reduzir o tempo de ajustamento de máquinas (Söderberg et al., 2017).

2.4.3. *Digital Twins* como ferramenta para assegurar a geometria dos produtos manufaturados

De acordo com Söderberg et al. (2017), o processo de assegurar a geometria dos produtos manufaturados inclui um conjunto de atividades que visam minimizar variações geométricas no produto final, de modo a reduzir custos e a mitigar a necessidade de ajustamentos na fase de manufatura, os quais representam custos superiores àqueles que seriam incorridos caso a alteração fosse realizada na fase de pré-produção. Deste modo, propõem o recurso a *Digital Twins* para assegurar a geometria dos produtos manufaturados numa linha de montagem altamente automatizada, cuja produção deve obedecer a parâmetros de elevada qualidade e rendimento, representando os problemas relacionados com geometria uma parte substancial dos custos totais por baixa qualidade e originando atrasos e modificações tardias.

Assim, é criado e usado um *Digital Twin* na fase de pré-produção que recorre a representações geométricas das diferentes partes que compõem o produto e que contém os requisitos de montagem para simular variações de modo a garantir o cumprimento dos intervalos de tolerância, ao conter dados relativos a variações observadas em produções anteriores semelhantes. Deste modo, é possível desenvolver produtos robustos e distribuir tolerâncias.

O *Digital Twin*, tendo completado todos os ajustamentos necessários para o processo de manufatura, transita subsequentemente para essa fase. Durante a fase de manufatura, o *Digital Twin* adquire, através dos parâmetros definidos para o produto final, dados para realizar a inspeção e desempenhar o controlo em tempo real do sistema de montagem, que lhe permitem detetar e corrigir erros, eliminando a necessidade de inspeção física (Söderberg et al., 2017).

2.4.4. *Digital Twins* como ferramenta para *smart manufacturing*

A evolução das tecnologias de informação, que compreendem a IA, IoT, *Big Data* e *Cloud Computing* e a interação destas com *Digital Twins* potencializam a transformação do processo de manufatura num processo de *smart manufacturing*. No processo de *smart manufacturing*, todos os elementos do processo de manufatura podem ser considerados como um *Digital Twin*, desde uma peça do equipamento, até à fábrica na sua globalidade (Qi et al., 2018).

Qi et al. (2018) propõem que o modelo de três dimensões de *Digital Twins* apresentado por Grieves (2015), que compreende os elementos físicos, modelos virtuais e ligações de *data* e informação que conectam os elementos virtuais e reais num só, seja expandido para um modelo de cinco dimensões, através da incorporação das vertentes de serviços e de *fusion data*.

Em suma, de acordo com Qi et al. (2018), o modelo de cinco dimensões proposto apresenta como componentes:

- i) Elementos físicos, que correspondem a elementos com funções específicas para completar as tarefas do processo de manufatura de acordo com os respetivos *inputs* e *outputs*;
- ii) Modelos virtuais, que consistem na representação digital dos elementos físicos e que têm a capacidade de espelhar de forma fiável o seu ciclo de vida;
- iii) Serviços, que englobam funções de gestão, controlo e otimização. É proposto que estas funções sejam incorporadas numa plataforma (*e.g.*, aplicação) de gestão de serviços associada ao *Digital Twin* que visa apoiar utilizadores na tomada de decisão relativa ao processo de manufatura;
- iv) *Fusion data*, que corresponde aos dados oriundos dos elementos físicos, dos modelos virtuais e dos serviços e à fusão destes, constituindo, assim, o *core driver* do *Digital Twin*;
- v) Ligações que conectam os quatro componentes mencionados num só, de modo a garantir que ocorram interações, em tempo real, entre eles que possibilitem a otimização de todo o processo de manufatura.

A expansão proposta do modelo conceptual dos *Digital Twins* visa, assim, alicerçar o conceito de *Digital Twin Shop-Floor* (Tao et al., 2018), cuja incorporação na manufatura permite elevar este processo para *smart manufacturing*.

3. Metodologia

A presente dissertação consubstancia-se no desenvolvimento de múltiplos casos de estudo, uma vez que pretende investigar uma problemática contemporânea inserida num contexto do mundo real (Yin, 2018). Dada a inexistência de teoria previamente publicada sobre o tema de investigação, apresenta uma vertente exploratória.

A recolha de dados foi feita através de entrevistas semiestruturadas a elementos de gestão integrados em áreas funcionais de empresas portuguesas cujo *core business* assente em atividades de produção de equipamentos industriais e desenvolvimento de sistemas de automação. A análise dos dados recolhidos foi feita de acordo com uma metodologia qualitativa, a qual permite compreender acontecimentos através da interpretação direta de narrativas (Stake, 1995).

Deste modo, foram realizadas entrevistas sobre uma amostra não probabilística intencional, dado que é pretendido estudar especificamente a realidade de empresas portuguesas inseridas nos setores de atividade referidos, que contêm potencialmente as características identificadas como relevantes para o objetivo do estudo (Clark et al., 2019).

Para o efeito de constituição da amostra, cinco empresas portuguesas foram identificadas através do Consórcio PRODUTECH, das quais quatro enquadram-se na definição de PME, uma vez que empregam entre onze a duzentas e cinquenta pessoas e o volume de negócios anual não excede os cinquenta milhões de euros. Uma única empresa enquadra-se na definição de grande empresa, empregando mais de duzentas e cinquenta pessoas e apresentando um volume de negócios anual superior a cinquenta milhões de euros.

Foi desenvolvido um guião (Anexo A), validado pelo orientador da presente tese, para suporte da condução das entrevistas, cuja operacionalização foi feita de acordo com a utilização de:

i) questões que permitem obter dados do contexto real (nome, cargo/responsabilidade do entrevistado na empresa, setor de atividade, idade da empresa, volume de negócios, número de funcionários, principais produtos e serviços);

ii) questões abertas que permitem refletir a subjetividade inerente às diferentes perspetivas da amostra em estudo, uma vez que possibilitam a recolha diversificada de abordagens de integração de uma solução (*Digital Twins*) que é ainda recente (Negri et al., 2017). Deste modo, o recurso a estas questões permite aferir o leque de distintas possibilidades e potencialidades da integração dos *Digital Twins*, o que vai de encontro aos objetivos definidos para a dissertação;

iii) questões cuja resposta insere-se numa escala de Likert, através das quais os entrevistados têm a oportunidade de exprimir a sua opinião sobre um conjunto de afirmações (Diamantopoulos & Winklhofer, 2001), em que 1 corresponde à opinião de que a integração dos *Digital Twins* nos seus equipamentos para uma dada finalidade é “Totalmente ineficaz”, 3 corresponde a uma posição neutra e 5 corresponde a “Totalmente eficaz”.

A elaboração das questões foi de encontro aos modelos de avaliação de maturidade na Indústria 4.0 desenvolvidos por Lichblau et al. (2015) e Agca et al. (2017), focando-se nas dimensões e sub-dimensões consideradas pertinentes para a perceção dos níveis de integração digital da empresa, uma vez que o objeto em estudo é especificamente a implementação de *Digital Twins*. O Quadro 3.1 apresenta as dimensões e sub-dimensões consideradas para a elaboração das questões propostas.

Quadro 3.1 – Questões propostas e respetivo enquadramento nos modelos de avaliação de maturidade na Indústria 4.0 desenvolvidos por Lichblau et al. (2015) e Agca et al. (2017).

Dimensão	Sub-dimensão	Referências bibliográficas	Questões Propostas	Fonte
Estratégia e Organização	Estratégia e nível de implementação	Lichblau et al. (2015); Agca et al. (2017)	Existe uma estratégia de digitalização definida, com objetivos a atingir? A estratégia de digitalização é orientada para a gestão? A estratégia de digitalização é orientada para o produto?	Elaboração própria
	Gestão de inovação	Lichblau et al. (2015)	Existe uma equipa responsável pela implementação da digitalização?	Elaboração própria
	Colaboração	Lichblau et al. (2015); Agca et al. (2017)	Quão eficazes são os <i>Digital Twins</i> para facilitar a colaboração e partilha de informação entre equipas/departamentos?	Elaboração própria
	Financeira	Agca et al. (2017)	Quão eficazes são os <i>Digital Twins</i> para a redução de custos?	Elaboração própria

Produto e serviços	Serviços <i>data-driven</i>	Lichblau et al. (2015); Agca et al. (2017)	Quão eficazes são os <i>Digital Twins</i> para a previsão de necessidades de manutenção e prevenção de falhas de equipamentos?	Elaboração própria
	Digitalização e capacidades digitais do produto	Lichblau et al. (2015); Agca et al. (2017)	Os equipamentos usados pela sua empresa possuem tecnologia que permite gerar dados (e.g., Sensores, RFID, ...)? Os equipamentos usados pela sua empresa estão a gerar dados?	Elaboração própria
	Utilização de dados do produto	Lichblau et al. (2015); Agca et al. (2017)	Os dados que estão a ser gerados estão a ser usados? Qual o principal âmbito de utilização dos dados? Se não usa dados gerados pelos <i>Digital Twins</i> , qual o motivo? Espera no futuro usar dados gerados através de <i>Digital Twins</i> ? Como?	Elaboração própria
Produção e operações	Integração do sistema máquina-operação e de tecnologias de informação	Lichblau et al. (2015); Agca et al. (2017)	Descreva o processo de utilização dos dados.	Elaboração própria
	Processos com capacidade de otimização autónoma	Agca et al. (2017)	Quão eficazes são os <i>Digital Twins</i> para a otimização de recursos?	Elaboração própria
Modelo de negócio	Tomada de decisão <i>data-driven</i>	Agca et al. (2017)	Quão eficazes são os <i>Digital Twins</i> para o apoio nos processos de tomada de decisão?	Elaboração própria
	Monitorização em tempo real	Agca et al. (2017)	Quão eficazes são os <i>Digital Twins</i> para a obtenção de dados reais?	Elaboração própria
	Planeamento em tempo real	Agca et al. (2017)	Quão eficazes são os <i>Digital Twins</i> para a simulação de cenários e condições reais?	Elaboração própria

Fonte: Elaboração própria

A realização das entrevistas aos elementos representativos de cada uma das cinco empresas selecionadas foi feita através de videochamada nas plataformas *Zoom* ou *Microsoft Teams*, com a duração média de 25 minutos.

As respostas obtidas foram registadas e seguidamente analisadas para, consequentemente, identificar quais os fatores facilitadores, barreiras e resultados que as cinco empresas entrevistadas encontraram na implementação de *Digital Twins* nos seus equipamentos.

4. Apresentação e Discussão de Resultados

Neste capítulo apresentam-se os resultados das entrevistas conduzidas às cinco empresas portuguesas que constituem a amostra, distribuídos por cinco diferentes subcapítulos. Dentro de cada subcapítulo, inicialmente é feito o enquadramento da dimensão de cada uma das empresas, a descrição da sua atividade e de que modo foi concretizada a entrevista. Seguidamente, são identificados os fatores facilitadores, barreiras e resultados encontrados na integração de *Digital Twins* nos seus equipamentos.

No último subcapítulo, ponto 4.6, são apresentadas as opiniões dos entrevistados sobre o potencial da integração dos *Digital Twins* nos seus equipamentos e analisados os resultados à luz da sua integração ou não desta solução tecnológica.

4.1. Empresa “A”

Enquadramento

A empresa “A” tem como principal atividade o desenvolvimento de projetos de automação e metalomecânica, contando com mais de quinze anos de experiência e cento e sessenta funcionários. O seu volume de negócios é entre dez e cinquenta milhões de euros, enquadrando-se, assim, na definição de PME.

A entrevista foi realizada por videochamada, através da plataforma *Zoom*, com a participação do seu Diretor Técnico. Atualmente, os dois principais produtos comercializados pela empresa “A” correspondem a máquinas e sistemas customizados, e focam-se na oferta de soluções de engenharia e manutenção industrial.

Fatores facilitadores

A empresa “A” apresenta uma estratégia de digitalização definida, com objetivos a atingir – esta estratégia é igualmente orientada tanto para a gestão, como para o produto. Apesar de não deter, à data da entrevista, uma equipa especificamente responsável pela implementação da digitalização, a gestão da inovação é um processo transversal aos diferentes departamentos atualmente existentes.

As máquinas e sistemas customizados da empresa “A” possuem tecnologia que permite gerar dados e encontram-se atualmente a gerá-los, sendo patente nos seus equipamentos capacidades digitais.

A empresa participa num vasto número de projetos de desenvolvimento a nível nacional e europeu que possibilitam a implementação da digitalização, dentro dos quais incluem-se projetos orientados especificamente para a integração da utilização de *Digital Twins* nos seus processos.

Barreiras

Como mencionado no ponto anterior, as máquinas e sistemas customizados da empresa “A” possuem tecnologia que permite gerar dados e estes dados estão, efetivamente, a ser gerados. No entanto, face à falta de Recursos Humanos com as competências necessárias, os dados que estão a ser gerados pelos seus equipamentos não se encontram, até à data da entrevista, a ser utilizados, não permitindo a consubstanciação dos *Digital Twins* nos seus processos.

Resultados

A empresa “A” encontra-se, em parceria com um consórcio nacional enquadrado no âmbito de um projeto cofinanciado pela União Europeia, a desenvolver um projeto para a criação de algoritmos que permitirão futuramente a utilização dos dados gerados pelos seus equipamentos. Consequentemente, a empresa planeia no futuro utilizar *Digital Twins* nos seus equipamentos no âmbito de duas finalidades possíveis:

- i) na vertente dos serviços de manutenção, para oferecer aos seus clientes a possibilidade de receberem alertas relacionados com manutenção preditiva;
- ii) na vertente da melhoria contínua, para otimizar o desenvolvimento dos seus produtos.

Para a concretização destes objetivos, é planeado focar a recolha de dados das suas máquinas relativos a temperatura, vibração, consumos de motores e tendências de operação.

4.2. Empresa “B”

Enquadramento

A entrevista à empresa “B” foi conduzida junto do seu Administrador, através de videochamada na plataforma *Microsoft Teams*. O setor de atividade da empresa corresponde à fabricação de equipamentos industriais, consistindo o seu principal produto em máquinas de processamento (corte e lapidação) de rochas ornamentais. Produz ainda máquinas de corte para a indústria do calçado e indústria automóvel.

Esta empresa conta com mais de quinze anos de atividade e enquadra-se na definição de PME, sendo constituída por cerca de trinta funcionários e apresentando um volume de negócios entre dois e dez milhões de euros.

Fatores facilitadores

Apesar de não contar com uma equipa especificamente responsável pela implementação da digitalização, esta empresa apresenta uma estratégia definida, com uma orientação tanto para a gestão, como para o produto. Aposta fortemente na inovação, detendo um vasto número de patentes industriais e estabelecendo protocolos de investigação com diferentes entidades de *Research & Development (R&D)* em diferentes projetos nacionais e europeus.

Os equipamentos industriais da empresa “B” possuem tecnologia que permite gerar dados, os quais estão atualmente a ser produzidos e utilizados no âmbito dos seus próprios processos produtivos, revelando sucesso na implementação dos *Digital Twins*.

Barreiras

Uma vez que a empresa “B” conseguiu integrar *Digital Twins* nos seus processos, não foram enunciadas nem identificadas barreiras ao longo da entrevista.

Resultados

Os *Digital Twins* encontram-se integrados nos equipamentos industriais da empresa, permitindo a obtenção e recolha de dados à medida que é feita a utilização das máquinas. Os dados são automaticamente registados num software de simulação de processos produtivos que

conceptualiza o *Digital Twin* dos respetivos equipamentos. Posteriormente, esses dados podem ser consultados nesse software de simulação ou transferidos para outros softwares *Enterprise Resource Planning* (ERP) para a monitorização no âmbito da produção.

4.3. Empresa “C”

Enquadramento

A empresa “C” oferece soluções tecnológicas apresentando, como principais produtos, sistemas de teste para componentes eletrónicos, sistemas de automação e linhas de produção. Tem mais de vinte anos de existência, contando com cerca de cem colaboradores e um volume de negócios entre dez e cinquenta milhões de euros. Assim, a empresa “C” enquadra-se na definição de PME.

A entrevista foi realizada junto da sua gestora de Investigação, Desenvolvimento e Inovação (IDI), através de videochamada na plataforma *Microsoft Teams*.

Fatores facilitadores

A empresa “C” apresenta uma estratégia de digitalização definida, orientada nomeadamente para gestão, mas também com algum foco no produto. Como referido pela gestora IDI desta entidade, os *Digital Twins* estão inseridos na estratégia da empresa num futuro próximo, para fins de utilização própria.

À data da entrevista, as soluções tecnológicas que produz permitem gerar e encontram-se a gerar dados, verificando-se capacidades digitais do seu equipamento.

Importa referir que a empresa encontra-se associada a outras entidades, nomeadamente nacionais, no âmbito do desenvolvimento de soluções de tecnologias de produção inovadoras, participando em parcerias.

Barreiras

Apesar de esta empresa apresentar uma estratégia de digitalização definida, não detém uma equipa responsável pela sua implementação. A empresa identifica que esta situação conduz a uma escassez de recursos humanos e tempo para ser possível a integração dos *Digital Twins*.

Adicionalmente, uma das principais barreiras identificadas para a implementação dos *Digital Twins* nas soluções tecnológicas que a empresa “C” desenvolve prende-se com as regras impostas pelo regulamento da União Europeia sobre o Regime Geral de Proteção de Dados (RGPD), mencionando a necessidade de permissão do cliente para a obtenção dos dados.

Resultados

Conforme mencionado pela gestora IDI, a empresa “C” planeia, como possibilidade para superar a barreira relativa à necessidade de permissão para obtenção dos dados, propor a participação de clientes em projetos de *Research & Development* (R&D) e focar-se na apresentação das mais-valias passíveis de alcançar através desta permissão.

Para alcançar a integração dos *Digital Twins* nas soluções por si desenvolvidas, a empresa “C” planeia continuar a apostar em parcerias com entidades de R&D no âmbito do desenvolvimento digital.

4.4. Empresa “D”

Enquadramento

A empresa “D” conta mais de quinze anos de existência e encontra-se inserida no setor de produção de máquinas e equipamentos, focando-se na criação de sistemas integrados de automação e robótica para o desenvolvimento de máquinas e sistemas industriais.

A empresa enquadra-se na definição de PME, apresentando entre cinquenta e um a duzentos e cinquenta colaboradores e um volume de negócios situado entre dois e dez milhões de euros. Para a concretização da entrevista, foi realizada uma videochamada através do *Microsoft Teams* com a participação do seu Diretor Técnico.

Fatores facilitadores

Esta empresa apresenta uma estratégia de digitalização definida, existindo uma equipa responsável pela sua implementação. Esta estratégia é orientada, principalmente, para a digitalização do produto, assentando a sua atividade no desenvolvimento de soluções tecnológicas automatizadas inovadoras e estabelecendo parcerias com projetos de desenvolvimento a nível nacional e europeu.

Os equipamentos da empresa “D” possuem tecnologia que permite gerar dados, encontrando-se não só a gerá-los, como a utilizá-los para fins de manutenção.

Barreiras

Uma vez que a empresa “D” conseguiu integrar *Digital Twins* nos seus equipamentos, não foram enunciadas nem identificadas barreiras ao longo da entrevista.

Resultados

A empresa “D” alcançou a integração completa dos *Digital Twins* nos seus equipamentos e utiliza os dados obtidos para fins de manutenção. Tal é alcançado através da monitorização dos movimentos e consumos em atividade produtiva, obtendo-se numa base de dados a respetiva informação. Assim, é possível a utilização do *Digital Twin* como ferramenta de diagnóstico para a manutenção, que permite determinar degradações e deteriorações em componentes mecânicos.

No curto prazo, esta empresa tem como objetivo utilizar *Digital Twins* no âmbito do desenvolvimento do produto, através do estudo dos seus equipamentos em ambiente de simulação e utilizando os dados obtidos para facilitar a partilha de informação entre cliente e empresa.

4.5. Empresa “E”

Enquadramento

A empresa “E” foca a sua atividade na conceção e fabricação de moldes para a indústria de plásticos. Os seus principais produtos e serviços correspondem à criação de moldes técnicos para moldação por injeção e à produção de componentes técnicos de plástico para os setores alimentar, automóvel e eletrónico, encontrando-se em atividade há mais de quinze anos.

Com mais de mil e duzentos colaboradores e um volume de negócios superior a cinquenta milhões de euros, enquadra-se na definição de grande empresa. A entrevista decorreu junto do seu Diretor de Tecnologia e Inovação (CTIO), através de videochamada na plataforma *Microsoft Teams*.

Fatores facilitadores

A empresa “E” detém uma estratégia de digitalização definida, com objetivos a atingir, sendo esta estratégia igualmente orientada para a gestão e para o produto. Para este efeito, existe uma equipa responsável pela implementação da digitalização e a empresa apresenta ainda uma unidade de negócio inteiramente focada na inovação dos seus produtos e serviços.

A empresa participa ainda em diversos projetos nacionais e europeus de R&D, encontrando-se, à data da entrevista, a trabalhar num projeto para a digitalização do chão de fábrica que visa a obtenção, em tempo real, de informação sobre a produção, níveis de consumos e impactos através da utilização de *Digital Twins*.

Barreiras

Apesar de a empresa “E” integrar *Digital Twins* nos seus equipamentos industriais, foram destacadas diversas barreiras à sua integração. Em primeiro lugar, mencionou que a sua implementação requiere um elevado investimento, como, *e.g.*, em licenças de utilização, e, como tal, pressupõe uma extensa análise prévia de benefícios esperados face ao investimento e qual o consequente retorno do investimento.

Em segundo lugar, refere a necessidade de contratação de recursos humanos altamente qualificados, os quais requerem constante formação para ser possível acompanhar o ritmo da evolução tecnológica.

Resultados

Os equipamentos industriais da empresa “E” integram *Digital Twins*, estando efetivamente a gerar dados que são utilizados, nomeadamente, no âmbito da melhoria contínua. No entanto, esta não é a única vertente da sua aplicação, sendo que a empresa utiliza estes dados também nos âmbitos de produção, manutenção, planeamento e previsão.

A empresa “E” aplica, assim, os *Digital Twins* das seguintes formas:

i) Transmissão dos dados recolhidos para uma base de dados, para posterior visualização e análise histórica relativamente à eficiência produtiva e níveis de desperdício e rejeições de produtos;

ii) Como sistemas de visão artificial, visualizando as peças a serem produzidas dentro do molde e capturando fotografias em vários ângulos para análise através de comparação com

padrão definido. Se as fotografias corresponderem ao padrão definido, a peça é embalada. Caso contrário, se não corresponde ao padrão, gera um alerta para o operador rever a peça e descartar em caso de anomalia;

iii) Caso surja uma reclamação por parte dos clientes, os dados previamente recolhidos aquando da produção da ordem de fabrico são analisados para deteção de falhas;

iv) Identifica anomalias nas componentes e falta destas, enviando alertas a vários monitores sobre um sistema ou célula produtiva não estar a funcionar como consequência. Tal permite reduzir tempos de paragem ao possibilitar o conhecimento antecipado das necessidades de componentes e reparação.

Através da utilização dos *Digital Twins*, a empresa “E” tem como finalidade última otimizar cada um dos seus ciclos produtivos, pretendendo ir cada vez mais de encontro “à visão de Indústria 4.0”, conforme referido em entrevista. Em termos de capacidades a desenvolver através da implementação dos *Digital Twins*, o próximo objetivo é utilizar os dados produtivos recolhidos através da digitalização do chão de fábrica para a criação de modelos preditivos, recorrendo a modelação e simulação em *Cloud* para fins de previsão e planeamento futuros.

A longo prazo, a empresa pretende também que os dados obtidos através dos *Digital Twins* sejam utilizados para alcançar metas de redução da sua pegada carbónica e consequente melhoria dos seus níveis de sustentabilidade, de modo a potencializar a sua integração no conceito de Economia Circular.

4.6. Opinião dos entrevistados sobre a eficácia da integração dos *Digital Twins* nos seus equipamentos para o desenvolvimento de capacidades

A questão final da entrevista visa aferir a perceção dos entrevistados relativamente às capacidades que é possível desenvolver através da integração dos *Digital Twins* nos seus equipamentos. Esta questão foi apresentada de duas formas distintas:

i) Para os entrevistados que ainda não apresentavam *Digital Twins* integrados nos seus equipamentos, a questão colocada foi “Nos seus equipamentos, quão eficazes pensa que seriam os *Digital Twins* para desenvolver as seguintes capacidades?”;

ii) Para os entrevistados que já apresentavam *Digital Twins* integrados nos seus equipamentos, a questão colocada foi “Nos seus equipamentos, quão eficazes são os *Digital Twins* para desenvolver as seguintes capacidades?”.

No Quadro 4.1 é possível observar as opiniões dos entrevistados no que concerne à questão apresentada, encontrando-se as respostas das empresas que já integram *Digital Twins* nos seus equipamentos coloridas a verde, e as respostas das empresas que ainda não integram esta solução de digitalização coloridas a encarnado.

Quadro 4.1 – Respostas dos entrevistados à questão “Nos seus equipamentos, quão eficazes pensa que seriam/são os *Digital Twins* para desenvolver as seguintes capacidades?”.

Capacidades	Resultados	Totalmente ineficazes	Parcialmente ineficazes	Sem opinião	Parcialmente eficazes	Totalmente eficazes
Previsão de necessidades de manutenção e prevenção de falhas de equipamentos					■★	●◆▲
Obtenção de dados reais					■★	●◆▲
Simulação de cenários e condições reais			■	▲	★	●◆
Apoio nos processos de tomada de decisão			■		★	●◆▲
Redução de custos			■		★	●◆▲
Otimização de recursos			■			●◆▲★
Redução do <i>downtime</i>					◆▲■	●★
Facilitar a colaboração e partilha de informação entre equipas/departamentos			■		▲	●◆★
Os equipamentos de produção reagirem autonomamente e em tempo real a alterações nas condições				■▲	◆★	●

Legenda: ● Empresa “A”, ◆ Empresa “B”, ▲ Empresa “C”, ■ Empresa “D”, ★ Empresa “E”

Fonte: Elaboração própria

É possível observar que a opinião dos entrevistados converge para as opções de resposta relacionadas com a eficácia conferida pelos *Digital Twins* para o desenvolvimento das diferentes capacidades enumeradas, sendo evidenciada uma maior mancha gráfica na coluna correspondente à resposta “Totalmente eficazes”.

Uma única empresa considerou que a integração dos *Digital Twins* é totalmente eficaz para desenvolver todas as capacidades enumeradas – a empresa “A” –, apesar de ainda não ter integrado nos seus equipamentos esta solução. No entanto, a empresa “A” encontra-se no processo da sua integração e revela expectativas positivas para as capacidades que vai conferir aos seus processos.

A segunda empresa entrevistada que ainda não integrou nos seus equipamentos os *Digital Twins* – empresa “C” – revela uma perspetiva otimista para as capacidades potencialmente desenvolvidas através da implementação desta solução, considerando que, para cinco das nove capacidades enumeradas, revela total eficácia. Ainda assim, considera que, para as capacidades

de redução do *downtime* e para facilitar a colaboração e partilha de informação entre equipas/departamentos, revela um potencial parcialmente eficaz. Para as capacidades de simulação de cenários e condições reais e dos equipamentos de produção reagirem autonomamente e em tempo real a alterações nas condições, afirma uma posição de neutralidade, revelando que é algo que aguarda por constatar.

No que concerne às empresas que já integram *Digital Twins* nos seus equipamentos, importa referir que a empresa “D” já integra esta solução como ferramenta de diagnóstico para a manutenção, através da monitorização dos movimentos e consumos em atividade produtiva, o que lhe confere experiência para classificá-la como parcialmente eficaz para desenvolver as capacidades de previsão de necessidades de manutenção e prevenção de falhas de equipamento, bem como para a obtenção de dados reais. No entanto, no que concerne às restantes capacidades fora do seu âmbito de aplicação, a empresa “D” mostra uma posição de neutralidade.

Por outro lado, a empresa “B”, que também já integra *Digital Twins* nos seus equipamentos, classifica os *Digital Twins* como totalmente eficazes para desenvolver sete das nove capacidades enumeradas, o que é alicerçado pela sua atual aplicação desta solução para fins de produção, através da utilização dos dados em ambiente de simulação e monitorização. Como tal, a empresa “B” mostra que esta integração tem efetivamente contribuído para a obtenção de dados reais, previsões de manutenção e falhas, simulação de cenários, bem como para a otimização de recursos e redução de custos. Importa ainda enfatizar que encontram vantagens da utilização deste recurso para a sua estratégia, organização e modelo de negócio, aplicando os dados obtidos através dos *Digital Twins* para o apoio na tomada de decisão e para facilitar a colaboração e partilha entre equipas/departamentos.

Finalmente, a empresa “E”, que apresentou o maior número de diferentes aplicações dos dados obtidos através dos *Digital Twins*, apresenta uma opinião mais moderada quanto à eficácia da sua integração, situando-se grande parte das suas respostas na coluna “Parcialmente eficazes”. Porém, no que concerne ao desenvolvimento das capacidades de redução do *downtime*, a empresa “E” considera a integração dos *Digital Twins* como “Totalmente eficaz”, explicando que a possibilidade de envio de alertas para informar de faltas e anomalias de componentes reduz substancialmente o tempo de paragem por permitir identificar antecipadamente as necessidades de componentes e de reparação.

Por sua vez, no que concerne a capacidade de facilitar a colaboração e partilha de informação entre equipas/departamentos, o entrevistado explica que, anteriormente à integração dos *Digital Twins*, cada departamento preenchia os seus relatórios e eram necessárias autorizações para ter acesso aos relatórios de cada departamento; no entanto, atualmente os

dados recolhidos através dos *Digital Twins* são partilhados entre departamentos, sendo possível cada um extrair os dados para cálculo dos *Key Performance Indicators* (KPI) e interligar a informação transversalmente entre diferentes departamentos para apoio na tomada de decisão.

5. Conclusões, Limitações e Sugestões para Investigação Futura

5.1. Conclusões

A presente dissertação teve como principal foco a averiguação da integração de *Digital Twins* nos equipamentos e sistemas de empresas portuguesas inseridas nos setores de produção de equipamentos industriais e desenvolvimento de sistemas de automação. A motivação para o desenvolvimento desta investigação, e a sua pertinência, decorrem da deteção da lacuna de conhecimento empírico na literatura atual sobre esta problemática.

Através da realização de entrevistas semiestruturadas a cinco elementos de gestão integrados em áreas funcionais de empresas portuguesas inseridas nos setores de atividade previamente referidos, das quais quatro empresas enquadram-se na definição de PME e uma enquadra-se na definição de “grande empresa”, constatou-se que existe, à data de desenvolvimento desta investigação, a integração de *Digital Twins* nos equipamentos e sistemas de três das cinco empresas inquiridas.

As duas empresas que, à data das respetivas entrevistas, ainda não integravam *Digital Twins* nos seus equipamentos e sistemas, incluem a sua integração nas suas estratégias de digitalização, encontrando-se uma das empresas atualmente a desenvolver os recursos necessários (empresa “A”) para a sua integração futura.

Verifica-se ainda que, independentemente da dimensão da empresa incluída na amostra do estudo, a integração dos *Digital Twins* já é uma realidade no tecido empresarial português tanto em PME, como em grandes empresas. No entanto, constata-se que o nível de integração é consideravelmente mais elevado na grande empresa parte da amostra – empresa “E” –, que emprega a utilização dos dados obtidos através dos *Digital Twins* num maior número de âmbitos do que as PME estudadas (que à data das entrevistas, apresentavam uma única vertente de aplicação), tais como a melhoria contínua, produção, manutenção, planeamento e previsão.

Como fatores facilitadores da integração dos *Digital Twins* nos equipamentos e sistemas de empresas portuguesas, distinguem-se a existência de estratégias de digitalização definidas, com objetivos a atingir, nomeadamente quando as empresas detêm equipas especificamente responsáveis pela implementação da digitalização; no entanto, este não é um fator impeditivo da integração dos *Digital Twins*, uma vez que a inexistência de uma equipa orientada para a implementação da digitalização pode ser colmatada através da inclusão de diferentes departamentos para a gestão da inovação, sendo este um processo transversal, ou ainda através da participação em parceiras assentes em projetos de R&D orientados para a digitalização.

Ainda como fator facilitador da integração dos *Digital Twins*, destaca-se a capacitação dos equipamentos e sistemas das empresas com tecnologia que permite gerar dados, conferindo às empresas a possibilidade de, efetivamente, consubstanciar a utilização dos *Digital Twins* nos seus processos.

Através do presente estudo, foi ainda possível identificar potenciais barreiras à integração dos *Digital Twins*, dentro das quais se destaca o investimento necessário para a sua implementação, que pode assumir diferentes formas – na aquisição de licenças de utilização; na contratação de recursos humanos qualificados; e, ainda, na formação dos recursos humanos para alinhar as suas capacidades com o nível de evolução tecnológica dos *Digital Twins*. Adicionalmente, verifica-se que a implementação de regulamentos sobre proteção de dados (RGPD) impacta a possibilidade de obter os dados necessários para a integração dos *Digital Twins*.

Em suma, a integração dos *Digital Twins* nos equipamentos e sistemas de empresas portuguesas tem apresentado como resultados a possibilidade de utilizar dados gerados em ambiente produtivo para a simulação, monitorização da produção, diagnóstico de necessidades de manutenção, controlo de conformidade e, ainda, à deteção de anomalias e de falta de componentes, ao gerar alertas antecipados que permitem a redução do *downtime*.

Finalmente, conclui-se que as empresas, quer já integrem ou não *Digital Twins* nos seus equipamentos, percecionam a sua integração como um fator que confere eficácia para o desenvolvimento de capacidades, das quais se destacam a otimização de recursos, a facilitação da colaboração e partilha de informação entre equipas e departamentos, a previsão de necessidades de manutenção e prevenção de falhas de equipamento e, por último a obtenção de dados reais. Importa mencionar que se constata, através do estudo desenvolvido, algum ceticismo quanto à capacidade de os equipamentos reagirem autonomamente e em tempo real a alterações nas condições, fruto, nomeadamente, da ausência de observações desta capacidade.

5.2. Limitações e Sugestões para Investigação Futura

O presente estudo baseou-se na aplicação de uma metodologia qualitativa para a análise de entrevistas semiestruturadas realizadas a elementos de gestão integrados em áreas funcionais de cinco empresas portuguesas, inseridas em setores de atividade específicos. Paralelamente à pequena dimensão da amostra, esta é constituída por um universo não-uniforme, no qual se inclui uma grande empresa e quatro PME. Como tal, enfatiza-se que as conclusões obtidas

através desta investigação não podem ser extrapoladas ou identificadas como representativas da realidade empresarial em Portugal.

Tendo em consideração este facto, aliado à lacuna na literatura atual de conhecimento empírico sobre a problemática em investigação, deteta-se a oportunidade para investigação futura da implementação dos *Digital Twins* em empresas portuguesas presentes em outros setores de atividade. Assim, para alcançar uma maior caracterização da digitalização no tecido industrial português, sugere-se o desenvolvimento de estudos a empresas cujo *core business* assente em diferentes atividades de manufatura como, por exemplo, empresas inseridas na indústria automóvel ou do calçado, sendo particularmente interessante a integração dos *Digital Twins* nestas graças às suas capacidades para a monitorização, simulação e otimização de processos produtivos.

Referências Bibliográficas

- Agca, O., Gibson, J., Godsell, J., Ignatius, J., Wyn Davies, C., & Xu, O. (2017). An Industry 4 Readiness Assessment Tool. *International Institute for Product and Service Innovation* (pp. 1–19). University of Warwick, Warwick, UK. https://warwick.ac.uk/fac/sci/wmg/research/scip/reports/final_version_of_i4_report_for_use_on_websites.pdf
- Agrawal, M., Eloot, K., Mancini, M., & Patel, A. (2020). Industry 4.0: Reimagining manufacturing operations after COVID-19. CR. <https://www.mckinsey.com/capabilities/operations/our-insights/industry-40-reimagining-manufacturing-operations-after-covid-19#/>
- Austin-Morgan, T. (2017, 2 outubro). Maserati has fused cutting edge digitalisation methods with Italian passion to meet customer demand. *Eureka Magazine*. <https://www.eurekamagazine.co.uk/content/interview/maserati-has-fused-cutting-edge-digitalisation-methods-with-italian-passion-to-meet-customer-demand/>
- Axmann, B. & Harmoko, H. (2020). Industry 4.0 Readiness Assessment: Comparison of Tools and Introduction of New Tool for SME. *Tehnički glasnik*, 14, 212-217. <https://doi.org/10.31803/tg-20200523195016>
- Becker, J., Knackstedt, R. & Pöppelbuß, J. (2009). Developing Maturity Models for IT Management. *Business & Information Systems Engineering*, 1. 213-222. <https://doi.org/10.1007/s12599-009-0044-5>
- Boschert, S., & Rosen, R. (2016). Digital Twin – The Simulation Aspect. In Hehenberger, P. & Bradley, D. (Eds.), *Mechatronic Futures: Challenges and Solutions for Mechatronic Systems and their Designers* (pp. 59–74). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-32156-1_5
- Clark, T., Foster, L., & Bryman, A. (2019). How to do Your Social Research Project or Dissertation. Oxford University Press.

- Coors-Blankenship, J. (2020, 29 abril). Taking Digital Twins for a Test Drive with Tesla, Apple. *Industry Week*. <https://www.industryweek.com/technology-and-iiot/article/21130033/how-digital-twins-are-raising-the-stakes-on-product-development>
- Diamantopoulos, A., & Winklhofer, H. M. (2001). Index Construction with Formative Indicators: An Alternative to Scale Development. *Journal of Marketing Research*, 38(2), 269-277. <https://doi.org/10.1509/jmkr.38.2.269.18845>
- Glaessgen, E. H., & Stargel, D. S. (2012, 23-26 abril). *The Digital Twin Paradigm for Future NASA and U.S. Air Force Vehicles* [Paper presentation]. 53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference, Honolulu, HI, USA. <https://doi.org/10.2514/6.2012-1818>
- Grieves, M. (2015). *Digital Twin: Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication*. ResearchGate. https://www.researchgate.net/publication/275211047_Digital_Twin_Manufacturing_Excellence_through_Virtual_Factory_Replication
- Grieves, M., & Vickers, J. (2017). Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems. In Kahlen, J., Flumerfelt, S., & Alves, A. (Eds.), *Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-38756-7_4
- Jiao, J., Simpson, T. W., & Siddique, Z. (2007). Product family design and platform-based product development: A state-of-the-art review. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 18, 5-29. <https://doi.org/10.1007/s10845-007-0003-2>
- Kritzinger, W., Karner, M., Traar, G., Henjes, J., & Sihn, W. (2018). Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification. *IFAC-PapersOnLine*, 51(11), 1016-1022. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.474>
- Lichblau, K., Stich, V., Bertenrath, R., Blum, M., Bleider, M., Millack, A.; Katharina, S.; Schmitz, E., & Schröter, M. (2015). IMPULS-Industrie 4.0 Readiness, 1–77. <https://impuls-stiftung.de/wp-content/uploads/2022/05/Industrie-4.0-Readiness-english.pdf>

- Lo, C.K., Chen, C.H., & Zhong, R. Y. (2021). A review of digital twin in product design and development. *Advanced Engineering Informatics*, 48(101297). <https://doi.org/10.1016/j.aei.2021.101297>
- Mittal, S., Khan, M. A., Romero, D. & Wuest T. (2018). A critical review of smart manufacturing & Industry 4.0 maturity models: Implications for small and medium-sized enterprises (SMEs). *Journal of Manufacturing Systems*, 49, 194-214. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2018.10.005>.
- Negri, E., Fumagalli, L., & Macchi, M. (2017). A Review of the Roles of Digital Twin in CPS-based Production Systems. *Procedia Manufacturing*, 11, 939-948. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.198>
- Neto, A. A., Deschamps, F., Silva, E. R., & Lima, E. P. (2020). Digital twins in manufacturing: an assessment of drivers, enablers and barriers to implementation. *Procedia CIRP*, 93, 210-215. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.04.131>
- 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(B), 3-21. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2019.10.001>
- Qi, Q., Tao, F., Zuo, Y., & Zhao, D. (2018). Digital Twin Service towards Smart Manufacturing. *Procedia CIRP*, 72, 237-242. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.03.103>
- Rosen, R., Wichert, G., Lo, G., & Bettenhausen, K. D. (2015). About The Importance of Autonomy and Digital Twins for the Future of Manufacturing. *IFAC-PapersOnLine*, 48(3), 567-572. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.06.141>
- Sá, C., Figueiredo, H., Cerejeira, J., & Rodrigues, M. (2023). “A digitalização no emprego, nas empresas e na educação”. *Estado da Nação 2023*, 19–51.
- 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/10.1016/j.cirp.2017.04.040>

- Schützer, K., Bertazzi, J. A., Sallati, C., Anderl, R., & Zancul, E. (2019). Contribution to the development of a Digital Twin based on product lifecycle to support the manufacturing process. *Procedia CIRP*, 84, 82-87. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.03.212>
- 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/10.1016/j.cirp.2017.04.038>
- Stake, R. E. (1995). *A Arte da Investigação com Estudos de Caso* (4.^a Edição). Fundação Calouste Gulbenkian.
- Tao, F., Cheng, J., Qi, Q., Zhang, M., Zhang, H., & Sui, F. (2018). Digital twin-driven product design, manufacturing and service with big data. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 94, 3563–3576. <https://doi.org/10.1007/s00170-017-0233-1>
- 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>
- Uhlemann, T. H.-J., Schock, C., Lehmann, C., Freiberger, S., & Steinhilper, R. (2017). The Digital Twin: Demonstrating the Potential of Real Time Data Acquisition in Production Systems. *Procedia Manufacturing*, 9, 113-120. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.04.043>
- Ulrich, K. T., & Eppinger, S. D. (2016). *Product Design and Development* (Sixth Edition). McGraw-Hill Education
- Yin, R. K. (2018). *Case study research and applications: Design and methods* (Sixth Edition). SAGE Publications, Inc.

Anexos

Anexo A - Guião para entrevista

Tópicos:

Tópico I – Caracterização da empresa

1. Qual o nome da empresa?

2. Qual o seu cargo/responsabilidade na empresa?

3. Qual o setor de atividade da empresa?

4. Qual a idade da empresa?

(Sugestões de resposta: Até 5 anos; Entre 6 a 10 anos; Entre 11 a 15 anos; Superior a 15 anos)

5. Qual o volume de negócios da empresa?

(Sugestões de resposta: Até 2 milhões de euros; Até 10 milhões de euros; Até 50 milhões de euros; Superior a 50 milhões de euros)

6. Qual o número de funcionários da empresa?

(Sugestões de resposta: Até 10; Entre 11 a 50; Entre 51 a 250; Mais de 250)

7. Quais os 3 principais produtos e/ou serviços da empresa?

Tópico II – Digitalização da empresa

8. Existe uma estratégia de digitalização definida, com objetivos a atingir?

9. Existe uma equipa responsável pela implementação da digitalização?

10. A estratégia de digitalização é orientada para a gestão?

11. A estratégia de digitalização é orientada para o produto?

Tópico III – Integração dos Digital Twins

12. Os equipamentos usados pela sua empresa possuem tecnologia que permite gerar dados (*e.g.*, Sensores, RFID, ...)?

13. Os equipamentos usados pela sua empresa estão a gerar dados?

14. Os dados que estão a ser gerados estão a ser usados?

Cenários:

A) Caso exista integração dos Digital Twins:

15. Qual o principal âmbito de utilização dos dados?

(Sugestões de resposta: Manutenção; Planeamento/Previsão; Produção; Melhoria contínua).

16. Por favor descreva o processo de utilização dos dados.

B) Caso não exista integração dos Digital Twins:

17. Se não usa dados gerados pelos Digital Twins, qual o motivo?

(Sugestões de resposta: Falta de Recursos Humanos; Falta de tempo; Falta de disponibilidade para usar tecnologia; Falta de interesse; Outro(s) motivo(s) – pedir para especificar).

18. Espera no futuro usar dados gerados através de Digital Twins? Como?

C) Caso equipamentos não gerem dados:

19. Qual o motivo pelo qual os seus equipamentos não geram dados através de Digital Twins?

(Sugestões de resposta: Falta de Recursos Humanos; Falta de tempo; Falta de disponibilidade para usar tecnologia; Falta de interesse; Outro(s) motivo(s) – pedir para especificar).

20. Espera no futuro usar dados gerados através de Digital Twins? Como?

Tópico IV – Potencial da Integração de Digital Twins

Cenários:

A) Caso exista integração dos Digital Twins:

21. Nos seus equipamentos, quão eficazes são os Digital Twins para desenvolver as seguintes capacidades:

(Possibilidades de resposta: 1. Totalmente ineficazes; 2. Parcialmente ineficazes; 3. Sem opinião; 4. Parcialmente eficazes; 5. Totalmente eficazes.)

- i) Previsão de necessidades de manutenção e prevenção de falhas de equipamentos?
- ii) Obtenção de dados reais?
- iii) Simulação de cenários e condições reais?
- iv) Apoio nos processos de tomada de decisão?
- v) Redução de custos?
- vi) Otimização de recursos?
- vii) Redução do *downtime*?
- viii) Facilitar a colaboração e partilha de informação entre equipas/departamentos?
- ix) Os equipamentos de produção reagirem autonomamente e em tempo real a alterações nas condições?

B) Caso não exista integração dos Digital Twins:

22. Nos seus equipamentos, quão eficazes pensa que seriam os Digital Twins para desenvolver as seguintes capacidades:

(Possibilidades de resposta: 1. Totalmente ineficazes; 2. Parcialmente ineficazes; 3. Sem opinião; 4. Parcialmente eficazes; 5. Totalmente eficazes.)

- i) Previsão de necessidades de manutenção e prevenção de falhas de equipamentos?
- ii) Obtenção de dados reais?
- iii) Simulação de cenários e condições reais?
- iv) Apoio nos processos de tomada de decisão?
- v) Redução de custos?
- vi) Otimização de recursos?
- vii) Redução do *downtime*?
- viii) Facilitar a colaboração e partilha de informação entre equipas/departamentos?
- ix) Os equipamentos de produção reagirem autonomamente e em tempo real a alterações nas condições?

Tópico V – Conclusão

23. Que outro(s) aspeto(s) considera importantes na utilização e/ou integração de Digital Twins que não tenha(m) sido referido(s)?