



A DIGITALIZAÇÃO E A DESCENTRALIZAÇÃO DA PRODUÇÃO NA INDÚSTRIA 4.0: DIGITAL TWIN

FERNANDO JOSÉ GONÇALVES OSÓRIO BIANCHI DA CÂMARA
setembro de 2023

A DIGITALIZAÇÃO E A DESCENTRALIZAÇÃO DA PRODUÇÃO NA INDÚSTRIA 4.0

Fernando José Gonçalves Osório Bianchi da Câmara

2023

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica

A DIGITALIZAÇÃO E A DESCENTRALIZAÇÃO DA PRODUÇÃO NA INDÚSTRIA 4.0

Fernando José Gonçalves Osório Bianchi da Câmara

1171295

Dissertação apresentada ao Instituto Superior de Engenharia do Porto para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação do Professor Adjunto Doutor Hélio Cristiano Gomes Alves de Castro

2023

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer ao Eng. Hélio Castro pelo apoio demonstrado ao longo do desenvolvimento desta tese. As suas contribuições foram fundamentais para o meu desenvolvimento académico.

Agradeço também á minha família pelo apoio demonstrado durante esta fase.

página propositadamente em branco

RESUMO

A indústria 4.0 representa um ponto de viragem na filosofia do modelo produtivo, uma vez que assenta em sistemas autónomos de produção com o objetivo de melhorar a produtividade, qualidade do produto e prazo de entrega ao cliente.

A digitalização e evolução das tecnologias de informação permitiu a criação do modelo virtual do sistema produtivo, denominado Digital Twin, com a capacidade de simular diferentes cenários fornecendo suporte a uma melhor tomada de decisão. Esta ferramenta não representa apenas uma cópia virtual do mundo físico que obtém informação sobre o estado da cadeia de valor, mas também ilustra um sistema capaz de alterar o desenvolvimento da atividade produtiva em função do cumprimento das metas empresariais pretendidas.

Uma linha de produção baseada no Cyber-Physical System garante um conjunto de características necessárias para produção personalizada, alargando a versatilidade do produto com um design adaptável para diferentes requisitos.

Nos últimos anos a procura pela personalização do produto tem crescido de forma considerável pelo que é necessário desenvolver filosofias flexíveis e versáteis de forma a responder aos pedidos dos clientes. A produção descentralizada procura responder a estas necessidade pois permite aglomerar diversos serviços com diferentes localizações geográficas, promovendo a partilha de recursos.

A dissertação incorpora o desenvolvimento de uma plataforma digital de personalização da produção, em que o cliente pode definir uma fábrica virtual capaz de produzir o produto pretendido, procurando apresentar uma solução para as necessidades do mercado.

A solução encontrada incorpora uma filosofia de inovação fazendo nascer uma ferramenta disruptiva face aquilo que se encontra atualmente no mercado, que permite desenvolver produtos personalizados através da agregação de diferentes recursos com localizações geográficas distintas. A maior parte da literatura sobre este tema apenas enfatiza a utilização dos *Digital Twin* numa unidade de produção local, mas neste caso propõe-se a sua utilização numa rede conjunta de unidades produtivas com localizações distintas, o que permite uma maior flexibilidade na personalização do produto.

A plataforma apresenta os recursos disponíveis em diferentes localizações geográficas permitindo a sua alocação, com o objetivo de integrar todo o desenvolvimento do produto. A rede de fornecedores com recursos disponíveis a serem utilizados pelos clientes constitui a base para o conceito de descentralização da produção, dando também a possibilidade de monitorização do estado das subcontratações efetuadas pelo cliente, em tempo real associado a um dos pilares da indústria 4.0 que é o IoT.

PALAVRAS-CHAVE

Indústria 4.0; Digital Twin; Cyber-Physical System; Smart Factory; Personalização do Produto.

página propositadamente em branco

ABSTRACT

Industry 4.0 represents a turning point in the philosophy of the production model, as it is based on autonomous production systems with the aim of improving productivity, product quality and customer delivery times.

The digitalization and evolution of information technologies has made it possible to create a virtual model of the production system, called Digital Twin, with the ability to simulate different scenarios to support better decision-making. This tool not only represents a virtual copy of the physical world that obtains information on the state of the value chain, but also illustrates a system capable of altering the development of production activity in line with the fulfilment of the desired business goals.

A production line based on the Cyber-Physical System guarantees a set of features necessary for personalized production, extending product versatility with an adaptable design for different requirements.

In recent years the demand for product customization has grown considerably, so it is necessary to develop flexible and versatile philosophies to respond to customer requests. Decentralized production seeks to respond to these needs as it makes it possible to bring together various services with different geographical locations, promoting the sharing of resources.

The dissertation incorporates the development of a digital platform for customizing production, in which the client can define a virtual factory capable of producing the desired product, seeking to present a solution to market needs.

The solution found incorporates a philosophy of innovation, giving rise to a disruptive tool compared to what is currently on the market, which allows customized products to be developed through the aggregation of different resources with different geographical locations. Most of the literature on this subject only emphasizes the use of Digital Twin in a local production unit, but in this case, it is proposed to use it in a joint network of production units with different locations, which allows for greater flexibility in product customization.

The platform shows the resources available in different geographical locations, allowing them to be allocated with the aim of integrating all product development. The network of suppliers with available resources to be used by customers forms the basis for the concept of decentralizing production, also enabling the status of subcontracts made by the customer to be monitored in real time, associated with one of the pillars of Industry 4.0, which is the IoT.

KEYWORDS

Industry 4.0; Digital Twin; Cyber-Physical System; Smart Factory; Product Customization.

página propositadamente em branco

ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS	IX
ÍNDICE DE TABELAS	XI
LISTAS DE SIGLAS E SÍMBOLOS.....	XIII
1. INTRODUÇÃO	15
1.1. Contextualização	15
1.2. Objetivos	15
1.3. Metodologia	16
1.4. Estrutura do relatório.....	16
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	17
2.1. Indústria 4.0.....	17
2.1.1. Contextualização da Indústria 4.0.....	17
2.1.2. Tecnologias impulsionadoras da indústria 4.0.....	18
2.1.2.1. Internet of Things (IoT).....	19
2.1.2.2. Inteligência artificial	20
2.2. Cyber-Physical System.....	21
2.2.1. Contextualização dos Sistemas CPS	22
2.2.2. Arquitetura do CPS.....	23
2.2.2.1. Arquitetura 5C.....	24
2.2.2.2. Arquitetura RAMI 4.0	25
2.2.2.3. Exemplos de Aplicação da Arquitetura CPS na Produção	26
2.3. Digital Twin.....	27
2.3.1. Contextualização do Conceito DT	28
2.3.2. Características do DT.....	29
2.3.3. Implementação do DT e CPS no Processo Produtivo.....	31
2.3.4. Propriedades do DT na Integração no Sistema Produtivo	32
2.3.5. Casos de Estudo	33
2.4. Personalização do Produto.....	34
2.4.1. Customização em Massa VS Customização Inteligente	34
2.4.2. Aplicação do DT na Customização Inteligente	35
2.4.3. Produção Descentralizada.....	36
3. Desenvolvimento	39
3.1. Arquitetura Proposta.....	39
3.1.1. Nível 0 – Intervenientes na arquitetura proposta	42
3.1.2. Nível 1 – Elementos integrantes da arquitetura proposta	43
3.1.3. Nível 2 – Estrutura de comunicação da arquitetura proposta.....	44
3.2. Implementação da arquitetura proposta: Fábrica Digital.....	45
3.2.1. Implementação da arquitetura de comunicação.....	46

3.2.1.1. Desenvolvimento da Arquitetura de comunicação proposta	46
3.2.1.2. Aplicação prática da arquitetura proposta	50
3.2.2. Plataforma virtual	54
3.2.2.1. Definição do produto	54
3.2.3. Desenvolvimento da Fábrica Digital.....	57
3.2.3.1. Seleção dos recursos integrantes.....	58
3.2.4. Virtualização e monitorização da linha produtiva	60
4. CONCLUSÃO	63
4.1. Conclusões finais	63
4.2. Limitações e trabalhos futuros.....	64
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	65

página propositadamente em branco

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Tecnologias da Indústria 4.0 [8]	19
Figura 2 - Sistema de produção inteligente [26]	21
Figura 3 - Integração da arquitetura com a pirâmide de automação [37].....	24
Figura 4 - Arquitetura RAMI 4.0 [7].....	25
Figura 5 - Arquitetura Multi-Agent [9]	27
Figura 6 - Esquema de funcionamento do DT [34].....	29
Figura 7 - Classificação do nível de integração consoante o fluxo de dados [51]	30
Figura 8 - Integração do DT no sistema produtivo [17]	32
Figura 9 - Fluxograma da dependência do mundo físico, CPS e DT [44].....	32
Figura 10 - Arquitetura proposta	41
Figura 11 - Nível 0 da arquitetura proposta	42
Figura 12 - Nível 1 da arquitetura proposta	43
Figura 13 - Fluxograma da definição do produto.....	44
Figura 14 - Nível 2 da arquitetura proposta	45
Figura 15 - Arquitetura de comunicação.....	47
Figura 16 - Sensores desenvolvidos em Python	47
Figura 17 - Base de dados no MySQL	48
Figura 18 - Arquitetura Node-Red.....	48
Figura 19 – Integração do Node-red e MySQL.....	48
Figura 20 - Base de dados	49
Figura 21 - Dashboard criado no node-red	49
Figura 22 – a) Placa de desenvolvimento ESP32; b) Placa de ensaio Breadboard; c) Sensor de temperatura e humidade DHT11; d) Cabo jumper macho-macho; e) Integração de todos os componentes;	50
Figura 23 – c) Código adaptado para integração no Node-Red; d) Output	51
Figura 24 – a) Fluxo desenvolvido no Node-red; b) Output/Valores recebidos pelo sensor DHT11	51
Figura 25 - Funções utilizadas na construção dos gráficos.	52
Figura 26 - Resultado obtidos pelo sensor	53
Figura 27 – Formulário para definição do produto	55
Figura 28 - Formulário para definição dos componentes	56
Figura 29 - Formulário para definição das etapas de fabrico.....	57
Figura 30 – Exemplo de uma linha produtiva	57
Figura 31 - Recursos disponíveis e adequados.....	58
Figura 32 - Distribuição geográfica dos recursos selecionados disponíveis.....	59
Figura 33 - Exemplo do sequenciamento das operações subcontratadas.....	59
Figura 34 - Proposta para uma nova solução de uma fábrica virtual	61

página propositadamente em branco

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Tecnologias de implementação de produtos/serviços baseado em IoT	20
Tabela 2 - Níveis da arquitetura 5C	24
Tabela 3- Camadas da Arquitetura RAMI 4.0	26
Tabela 4 - Definições do DT	28
Tabela 5 - Desafios à integração do DT	30
Tabela 6 - Casos de estudo com aplicação do DT	33
Tabela 7 - Customização em massa VS Customização inteligente	35
Tabela 8 - A influencia do DT nas diferentes etapas do ciclo de vida do produto	35

página propositadamente em branco

LISTAS DE SIGLAS E SÍMBOLOS

Lista de Siglas

CPMC	Cyber-Physical Manufacturing Cloud
CPS	Cyber-Physical System
DL	Deep learning
DT	Digital Twin
HMI	Human Machine Interface
IA	Inteligência Artificial
IIRA	Industrial Internet Reference Architecture
IoT	Internet of Things
KMA	Knowledge Manager Agent
MA	Machine Agent
MES	Management Execution System
ML	Machine Learning
OPC-UA	Open Platform Communications - Unified Architecture
PA	Product Agent
PLC	Programmable Logic Controller
RAMI 4.0	Reference Architecture Model Industry 4.0
RFID	Identificação por radiofrequência
RSSF	Redes de sensores sem fios
SCADA	Supervisory Control And Data Acquisition
SOA	Service Oriented Architecture
SoS	System of System
TI	Tecnologias de Informação
CPMC	Cyber-Physical Manufacturing Cloud
CPS	Cyber-Physical System
DL	Deep learning

página propositadamente em branco

1. INTRODUÇÃO

Este relatório foi desenvolvido no âmbito da dissertação correspondendo à revisão bibliográfica, bem como o desenvolvimento do caso de estudo com o tema “A DIGITALIZAÇÃO E A DESCENTRALIZAÇÃO DA PRODUÇÃO NA INDÚSTRIA 4.0: DIGITAL TWIN”.

1.1. Contextualização

O mercado tem vindo a caminhar no sentido da personalização do produto e de forma a responder a esta necessidade, os fabricantes têm de recorrer a novas tecnologias, métodos de fabrico e filosofias de produção. A iniciativa “Indústria 4.0” tem como objetivo alcançar uma produção eficiente com custos reduzidos e fluxos de trabalho flexíveis, com o objetivo de entregar produtos personalizados de elevado padrão de qualidade, mantendo os níveis de produtividade obtidos na produção em massa. Os *Cyber-Physical System* (CPS) e o *Digital Twin* (DT) são dois pilares para a implementação desta filosofia em ascensão. [1]

Os CPS representam um marco importante no desenvolvimento da ciência da computação em contexto industrial, pois são elementos essenciais na construção de fábricas inteligentes. Neste sistema existe a capacidade de captação de dados da linha produtiva, de avaliação desses mesmos dados e de execução de ações definidas no mundo físico. [2]

Outro dos elementos centrais que permite atingir o sucesso na implementação da digitalização é o DT, pois permite que a informação criada em cada fase do ciclo de vida do produto seja armazenada e disponibilizada para as fases subsequentes. As fábricas de DT representam um conjunto dos modelos virtuais das unidades produtivas, sendo que nestes modelos podem ser testadas diferentes soluções e técnicas de otimização. [3]

1.2. Objetivos

O desenvolvimento deste relatório tem como principal objetivo o desenvolvimento de uma plataforma virtual centrada na descentralização da produção, sustentada do ponto de vista teórico pela revisão bibliográfica. Esta integra todo o ciclo de vida do produto, definindo os recursos a utilizar dos disponíveis no mercado, de forma a garantir um produto com as características pretendidas pelo cliente. Para além deste objetivo primordial, existem outros objetivos complementares, tais como:

- Conhecer a indústria 4.0;
- Compreender a arquitetura do CPS;
- Estudar as vantagens e limitações do DT;
- Entender as aplicações contemporâneas destas tecnologias;
- Explorar o conceito da personalização do produto;
- Criação da plataforma virtual assente numa partilha de recursos em rede;
- Utilização de ferramentas opensource na construção da plataforma;
- Demonstrar a utilização da plataforma a partir de um exemplo;

1.3. Metodologia

O desenvolvimento desta dissertação assentou essencialmente em três etapas: conhecimento da tecnologia, criação da plataforma digital e exemplo de utilização da plataforma aplicada a um produto.

A primeira etapa desta dissertação, baseou-se na pesquisa de informação em artigos científicos e também em jornais, revistas e algumas conferências. A investigação iniciou-se em torno do conceito indústria 4.0, porém após alguma pesquisa surgiram outros temas relevantes como os CPS e o DT. O método de investigação começou sempre do estudo do conceito teórico em geral, e após a compreensão da base teórica, integrou-se exemplos de aplicação para consolidar a parte prática do conceito, explorando também a descentralização da produção.

A segunda etapa associada à criação da plataforma digital iniciou com a escolha da ferramenta open-source para escrita da plataforma html e definição da arquitetura. Esta fase requereu uma reflexão e melhoria contínua da interface com o utilizador com o objetivo de facilitar a interação deste com os recursos a utilizar. Em paralelo, selecionou-se dois softwares para enriquecer a plataforma virtual denominados MySQL e Node-Red potenciando o armazenamento dos dados em tempo real e dashboards interativos para a sua visualização.

1.4. Estrutura do relatório

Este relatório divide-se em quatro capítulos.

No primeiro capítulo é efetuado uma introdução ao tema abordado no restante relatório, bem como a definição dos objetivos e a metodologia utilizada.

O segundo capítulo contém a revisão bibliográfica que dará suporte ao desenvolvimento da dissertação.

No terceiro capítulo é apresentado o desenvolvimento que inclui o desenvolvimento da arquitetura e a construção da plataforma virtual.

No quarto capítulo são apresentadas principais conclusões da execução desta dissertação, bem como os trabalhos futuros.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica que se segue tem como foco central a Indústria 4.0, uma revolução industrial que está a redefinir a forma como concebemos e executamos operações industriais. A Indústria 4.0 é impulsionada pela integração de tecnologias de ponta, tais como a Internet das Coisas (IoT), a inteligência artificial (IA) e a automação avançada, e tem como objetivo o desenvolvimento de sistemas de produção mais eficientes, flexíveis e inteligentes. Neste contexto, exploraremos de forma detalhada os pilares fundamentais da Indústria 4.0, incluindo a personalização do produto, a descentralização da produção e a implementação de digital twins, analisando as mais recentes descobertas e tendências identificadas na literatura acadêmica.

2.1. Indústria 4.0

A indústria 4.0 tem como base sistemas de produção autônomos com máquinas capazes de tomar decisões, ajustando as operações de fabrico sem intervenção humana. Este conceito é impulsionado por quatro tecnologias essenciais que são a *Internet of Things* (IoT), *Cloud Computing*, *Big Data* e análise de dados, sendo que estas oferecem suporte a outras tecnologias de ponta como a robótica, realidade virtual e impressão 3D [4, 5].

A adoção da indústria 4.0 revolucionou o processo produtivo, tornando-o flexível e exigindo um desenvolvimento profissional contínuo dos funcionários [6].

2.1.1. Contextualização da Indústria 4.0

A Indústria 4.0 teve origem em 2011, apresentado publicamente na feira de Hannover, num projeto tecnológico do governo alemão ligado aos conceitos *smart factory* e CPS. A primeira revolução industrial ocorre com a transição dos métodos de produção manual para máquinas movidas a vapor ou água. A segunda revolução industrial, recorrendo à eletricidade, transformou as fábricas em linhas modernas de produção, aumentando a produtividade da indústria. A terceira revolução industrial promove uma produção automatizada usando controladores lógicos programáveis (PLC) e tecnologias de comunicação no processo produtivo. Por fim, na indústria 4.0 os sistemas de produção podem executar decisões inteligentes por meio da comunicação em tempo real, resultante da integração em rede da linha produtiva com o CPS [7, 8].

Esta iniciativa tem como base a integração total dos sistemas de produção (sistemas físicos e tecnologias de informação) e apresenta três recursos de base isto é a integração horizontal através de redes de valor, a integração digital de toda a cadeia de valor e a integração vertical do sistema de produção em rede, proporcionando o aparecimento das fábricas inteligentes [9, 10, 11] que tem a capacidade de gerar um produto mais personalizado [12]. Para implementar estes conceitos é necessário criar ações em oito áreas distintas: padronização, arquitetura de referência, gestão de sistemas complexos, segurança, organização do trabalho, formação profissional, normalização e eficiência de recursos [9].

A indústria 4.0 visa a construção de fábricas inteligentes, onde as tecnologias de produção são atualizadas e transformadas por sistemas CPS, IoT e *cloud computing*. Há uma combinação das tecnologias dos sistemas produtivos incorporados com processos de produção inteligentes, que irá

transformar as cadeias de valor e modelos de negócio [13, 14]. Assim, este conceito utiliza os CPS para garantir uma produção inteligente, flexível e personalizável, integrando toda a cadeia de valor [10]. De forma a possibilitar a comunicação entre os diferentes elementos pertencentes ao sistema produtivo é necessária a existência de uma comunicação padrão universal como elemento agregador dos componentes dos sistemas inteligentes do futuro. A evolução acelerada da tecnologia de computação e da inteligência artificial, permitiu criar uma base sólida para a criação de fábricas inteligentes [1].

As tecnologias da indústria 4.0 permitem resolver os desafios da produção sustentável ao nível do sistema produtivo, que são referentes ao meio ambiente, à dimensão social e à economia. A indústria 4.0 contribui para a sustentabilidade através da redução do desperdício e utilização de energia limpa (energias renováveis), enquanto relativamente à dimensão social este conceito melhora as condições de trabalho e a experiência do cliente. Em relação à sustentabilidade económica, as tecnologias da indústria 4.0 melhoram a qualidade do produto, provocando uma menor taxa de defeitos. A produção sustentável é definida como sendo um conjunto de técnicas, atividades e estratégias capazes produzir bens economicamente viáveis e ao mesmo tempo, minimizar o impacto ambiental e valorizar o bem-estar e a segurança das partes interessadas [5, 14, 15].

Como visão complementar à indústria 4.0, surgiu a indústria 5.0, que apesar de utilizar as mesmas tecnologias, tem um maior foco nos objetivos sociais e por isso faz com que a produção respeite os limites de sustentabilidade do nosso planeta, demarcando assim a sua diferença face à indústria 4.0. A indústria 5.0 é centrada em três valores fundamentais que são a centralização no ser humano, sustentabilidade e resiliência que tem como tecnologias impulsionadoras o DT, Inteligência Artificial (IA), *Machine learning* (ML) e tecnologias associadas à sustentabilidade energética. Esta filosofia apresenta também alguns desafios como a heterogeneidade social, políticas de inovação orientada para a sustentabilidade e quantificar a geração de valor ambiental e social [7].

2.1.2. Tecnologias impulsionadoras da indústria 4.0

A indústria 4.0 está a despoletar diversas mudanças em vários setores da indústria, permitindo a criação de novos modelos de negócio devido ao desenvolvimento de novas tecnologias, como ML, IA, técnicas de análise de dados, desenvolvimento das Tecnologias de Informação (TI), aparecimento do DT e IoT, conforme ilustrado na

Figura 1 [16].

A IA em conjunto com o ML têm um papel fundamental no sistema de produção inteligente contribuindo com aprendizagem contínua, raciocínio e tomada de decisão, permitindo minimizar a intervenção humana [13].



Figura 1 - Tecnologias da Indústria 4.0 [8]

As tecnologias de informação englobam o Cloud Computing e o Big Data que fornecem plataformas, softwares, infraestruturas digitais e aplicações na forma de serviços, com um sistema ciberfísico de base que determina a melhor utilização de um conjunto partilhado de recursos de produção. Esta plataforma possibilita a análise de grandes quantidades de dados e sendo uma característica necessária face à crescente informação processada em toda a cadeia de valor num processo produtivo. O tratamento de dados de elevada complexidade apenas se atinge devido aos avanços da tecnologia de computação juntamente com a introdução da rede. A cooperação do CPS com o IoT abre caminho para a aplicação do conceito Big Data [9].

A conectividade entre todos os elementos do sistema produtivo é garantida pela IoT que permite esta nova abordagem de simulação, isto é a criação do DT, capaz de replicar sistemas de produção em tempo real, estabelecendo uma plataforma de apoio à monitorização, manutenção, gestão, otimização e segurança do sistema produtivo [17, 18].

A IoT refere-se à comunicação sem fios integrada com sensores e sistemas de computação, permitindo que os objetos sejam identificáveis e assim fornecer dados através da rede sem interação humana [9].

2.1.2.1. Internet of Things (IoT)

A IoT surgiu em 1999 por Kevin Ashton, representa uma rede global de máquinas e dispositivos capazes de interagir entre eles, impactando fortemente os modelos de negócios, uma vez que fornece controlo em tempo real do fluxo de materiais e produtos [19, 20, 21]. A fusão da tecnologia IoT com os sistemas CPS permite convergir as tecnologias de informação com as tecnologias operacionais, promovendo fábricas conectadas, com o objetivo de redimensionar o fluxo de trabalho e otimizar os custos de distribuição [8].

As tecnologias mais utilizadas para a implementação de produtos e serviços baseados em IoT estão apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Tecnologias de implementação de produtos/serviços baseado em IoT

Tecnologias	Descrição
Identificação por radiofrequência (RFID)	Reconhecimento automático e a captura de dados usando ondas de rádio, uma etiqueta e um leitor [19];
Redes de sensores sem fios (RSSF)	Dispositivos equipados com sensores autónomos e distribuídos espacialmente para controlar as condições físicas ou ambientais. Estes podem cooperar com sistemas RFID de forma a melhorar o rastreamento como localização, temperatura e movimentos [19, 21];
Middleware	É uma camada de software colocada entre os aplicativos de software que tem como objetivo a simplificação da integração das diferentes tecnologias [22];
Cloud computing	Solução <i>back-end</i> capaz de trabalhar com fluxos de dados elevados e processá-los para os dispositivos IoT em tempo real, que geram uma grande quantidade de dados, sendo necessário uma plataforma para os armazenar [20];
Aplicativos IoT	Os dispositivos e redes IoT permitem a conectividade física, enquanto os aplicativos permitem as interações entre dispositivos e pessoas, desde que os dados sejam analisados de forma adequada [19].

Um dos principais desafios dos dispositivos IoT é a elevada quantidade de dados que necessitam de ser armazenados e processados, tendo um elevado custo a investir nas infraestruturas necessárias para garantir os objetivos pretendidos [19]. A par disto, existe uma ameaça à segurança à medida que se implementa mais dispositivos numa rede IoT, constituindo um desafio à garantia da cibersegurança. Para isto é necessário desenvolver soluções capazes de proteger as empresas e utilizadores das tecnologias IoT de ataques cibernéticos [23]. Para além deste desafio de segurança impõe-se também questões de interoperabilidade e adaptabilidade a dimensões de elevada complexidade [24].

2.1.2.2. Inteligência artificial

A produção inteligente tornou-se um pilar da competitividade da indústria, suportada pela tecnologia da IA [25], com o objetivo de otimização através do tratamento da informação e de novas tecnologias. A acompanhamento do ciclo de vida do produto é facilitado pela utilização de sensores inteligentes, modelos de tomada de decisão adaptáveis, materiais avançados, dispositivos inteligentes e análise de dados. Na era da indústria 4.0, um sistema de produção inteligente usa a arquitetura orientada, de forma a fornecer serviços colaborativos, personalizáveis, flexíveis e reconfiguráveis, permitindo a integração do sistema de produção homem-máquina [13]. O sistema de produção inteligente está ilustrado na Figura 2.



Figura 2 - Sistema de produção inteligente [26]

A IA é o campo da ciência da computação que abrange o desenvolvimento de sistemas com capacidade de usar a linguagem e resolver problemas, tipicamente reservados aos humanos [27], essencial para promover a monitorização, gestão e controlo inteligente do sistema produtivo, com o objetivo de os tornar flexíveis a fim de responder aos requisitos do cliente [25, 28]. Este campo da ciência está relacionado com o processamento de dados, extração de padrões e geração de informação útil [29].

Diversos fatores contribuíram para o impulso recente da IA como a evolução do poder computacional, a digitalização da informação, a implementação do IoT e o desenvolvimento de novos algoritmos de ML. O ramo do IA em maior desenvolvimento é o ML associado ao desenvolvimento de algoritmos, que utilizam dados de treino para a otimização das previsões efetuadas por estes [27]. O Deep Learning (DL) é outro ramo da IA associado ao processamento da informação, porém mais direcionado para problemas de maior complexidade e dimensão, uma vez que estrutura o modelo em camada para simplificação da determinação das funções de ativação [30]. Estes dois ramos modelam a informação do sistema para atualizarem o DT [27].

A aplicação da IA permite a análise de vários cenários, potenciando a eficácia da tomada de decisão uma vez que esta é suportada por uma maior compreensão do comportamento do sistema. As decisões baseadas em IA permitem otimizar a ordem das operações do setor produtivo, bem como a sua duração e qualidade. Algumas das competências associadas a esta metodologia são a deteção e previsão de interrupções, seja para manutenção, seja devido a quebras de segurança e também o menor tempo de resposta em função da informação proveniente da cadeia de valor [27].

2.2. Cyber-Physical System

Atualmente, as empresas procuram manter a competitividade num cenário dominado pela evolução tecnológica e pela imprevisibilidade das exigências do mercado desenvolvendo modelos de apoio à decisão cada vez mais autónomos [2]. Estes sistemas ajustam-se aos distúrbios impostos sem programação detalhada e sem controlo humano, isto é, são capazes de decidir autonomamente que ações aplicar mediante um problema inesperado. A base deste conceito assenta no acesso à informação em tempo real do estado de todo o processo produtivo. Uma das consequências da implementação de um sistema mais autónomo é o aumento da complexidade do

modelo, uma vez que é necessário garantir uma resposta otimizada em cada momento do ciclo produtivo [3].

A digitalização no processo produtivo, impulsionada pelo desenvolvimento das TI como o *Cloud Computing*, *Big Data*, IA e IoT [31], é extremamente importante pois constitui uma ferramenta necessária para alcançar elevados níveis de produtividade. Para além disso deve-se privilegiar a modularidade no projeto de produtos e módulos de produção e também a autonomia do sistema, de forma que este consiga responder a diferentes solicitações sem necessidade de intervenção exterior. A conectividade consegue estabelecer um ciclo fechado recolhendo o feedback das ações tomadas, determina os desvios e define um caminho no sentido da otimização do produto [3].

2.2.1. Contextualização dos Sistemas CPS

O CPS representa uma grande promessa nas fábricas inteligentes no que diz respeito aos setores emergentes como a energia, saúde, robótica, entre outros. O termo CPS surgiu nos Estados Unidos em 2006, devido à crescente importância das interações entre os sistemas de computação ligados em rede e o mundo físico, criando um sistema de *feedback* capaz de otimizar uma cadeia de valor em tempo real com análises descritivas, preditivas e prescritivas [32, 33]. Este recorre a cálculos e processos de comunicação com o objetivo de interagir com os processos físicos e deste modo, adicionar capacidades aos sistemas físicos, porém requer a implementação de sistemas avançados de cibersegurança, garantindo a proteção contra ataques à privacidade e intrusão indesejada [9].

Os sistemas de produção inteligentes devem ser dotados da capacidade de recolher dados do processo produtivo em que estão inseridos e do seu redor, processar estes dados e através de algoritmos fornecer informação valiosa, que será a base da tomada de decisão [1]. Esta tomada de decisão ocorre de forma autónoma por parte dos CPS tendo em vista o objetivo final pretendido, denominando-se descentralização. A autonomia é uma das características dos CPS pois estes são capazes de aprender e adaptar-se às circunstâncias do meio ambiente de forma independente, garantindo o fornecimento de respostas moldadas à situação imposta [2]. Esta capacidade contribui para o aumento da flexibilidade e da adaptabilidade do sistema em resposta a um distúrbio externo, como por exemplo a variação da procura do mercado. A decisão autónoma assenta em procurar uma linha de pensamento semelhante à encontrada nos sistemas biológicos, isto é, como os humanos realizam tarefas de controlo, reconhecimento de padrões ou tomada de decisão [33, 34]. Decorrente desta autonomia, estes sistemas estão dotados dos seguintes atributos: auto-adaptação, auto-configuração, auto-organização, auto-aprendizagem, auto-otimização e autoproteção [2].

O CPS está presente no sistema produtivo sob várias formas, desde sistemas de sensores a robots colaborativos, e tem como elemento facilitador o aparecimento de novas tecnologias de comunicação. A exploração das tecnologias CPS está condicionada pelo carácter conservador das empresas e também pela baixa margem para investimento destas num sistema que ainda se encontra em melhoria e com algum grau de incerteza [9].

A implementação dos CPS no sistema produtivo resulta na integração de uma grande variedade de equipamentos, como sistemas de visão, sensores, robots, transportadores, equipamentos de metrologia, entre outros, bem como facilita a comunicação do processo a eles adjacentes como montagem, embalamento, transporte e controlo de qualidade. O CPS enfatiza as interações entre

as partes físicas e cibernéticas, incluindo o homem, permitindo que todos os níveis de produção possam comunicar entre si [9]. Os CPS requerem comunicação entre os diversos constituintes (sistemas, processos e pessoas) nas diferentes fases do desenvolvimento do produto, sendo o IoT o elemento facilitador [1]. Outra característica dos sistemas inteligentes será a modularidade, isto é, a capacidade de integrar diferentes configurações do sistema, conferindo uma fácil integração em qualquer linha produtiva [2].

De forma a possibilitar a comunicação entre os diferentes elementos pertencentes ao sistema produtivo é necessária a existência de uma comunicação padrão universal como elemento agregador dos componentes dos CPS. A padronização é essencial para permitir a integração de sistemas e processos, para implementar os sistemas inteligentes em grande escala tais como plataformas, formatos de dados, protocolos de comunicação e interfaces [1].

Embora o conceito CPS apresente um conjunto de vantagens, também demonstra alguns desafios como a necessidade de aquisição de competências sobre a tecnologia, e tecnicamente garantir a interoperabilidade dos equipamentos e proporcionar plataformas técnicas adequadas. Um dos desafios que pode atrasar os avanços desta tecnologia é a segurança, uma vez que a conexão entre equipamentos e serviços provoca vulnerabilidade no sistema, como por exemplo acesso indevido a uma rede PLC industrial. [8, 9] No desenvolvimento de uma plataforma, a segurança deve estar perfeitamente integrada no processo de criação desta [35].

2.2.2. Arquitetura do CPS

Uma das primeiras arquiteturas de referência no desenvolvimento de CPS é a arquitetura 5C, porém existem outras como a RAMI 4.0, focada na digitalização dos dispositivos da cadeia de valor, e a IIRA que integra indústrias com foco na tecnologia IoT. Ambas as arquiteturas são baseadas no modelo hierárquico do ANSI/ISA-95, ou seja, a pirâmide de automação do 5C, que determina a tecnologia padrão (OPC-UA) referente á arquitetura RAMI 4.0 para disponibilização de dados em tempo real. [36].

Para facilitar o entendimento da cobertura das arquiteturas de referência da Indústria 4.0, adotou-se como guia a pirâmide de automação industrial, esquematizada na Figura 3. A pirâmide de automação tradicional é composta por cinco níveis, sendo a base (nível 0) diz respeito à engenharia eletrotécnica como os PLC e o nível 1 representa interface homem-máquina (HMI - *Human Machine Interface*), seja localmente, seja remotamente. O nível 2 (SCADA - *Supervisory Control And Data Acquisition*) controla vários dispositivos do chão de fábrica em simultâneo através das saídas dos vários PLC) e o nível 3 diz respeito ao *Management Execution System* (MES) que realiza o controlo de todo o processo de fabrico. Por fim no topo da pirâmide está o nível 4 que introduz o ERP (*Enterprise Resource Planning*), permitindo integrar as diversas funções organizacionais para melhorar o suporte ao cliente [17, 37].

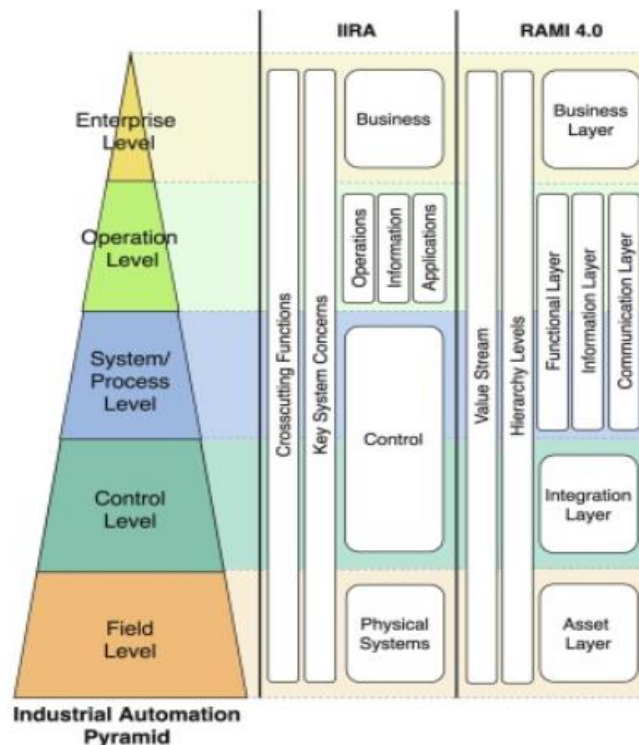


Figura 3 - Integração da arquitetura com a pirâmide de automação [37]

Estas duas arquiteturas têm correspondência com os diferentes níveis da pirâmide de automação, contudo há alguns módulos das arquiteturas que são transversais a todos os níveis [37]. Estas têm como características comuns a dissolução da pirâmide de automação, implementação de uma solução de comunicação que disponibiliza dados para todas as entidades em tempo real, captura do ciclo de vida do produto e do sistema produtivo, desenvolvimento de entidades cibernéticas que representam as entidades físicas [38].

2.2.2.1. Arquitetura 5C

Embora o modelo 5C forneça um guia de implementação de sistemas CPS, contendo boas diretrizes, algumas características básicas não foram levadas em consideração para sua aplicação no cenário da Indústria 4.0.

A arquitetura 5C tem como objetivo desenvolver e integrar os CPS no sistema produção [36], descrevendo o desenvolvimento de um CPS desde a aquisição de dados, análise até à criação de valor [39]. Esta arquitetura é composta por cinco camadas que estão descritas na Tabela 2 [8].

Tabela 2 - Níveis da arquitetura 5C

Nível	Camada	Descrição
V	<i>Configuration</i>	Transmissão do mundo virtual para o mundo físico, tornando as máquinas auto-ajustáveis e auto-adaptáveis [8, 39];
IV	<i>Cognition</i>	Funções de monitorização e previsão de falha ligado à otimização da manutenção [8, 39];

III	<i>Cybernetic</i>	Plataforma para a digitalização sendo responsável pela comunicação entre as diversas entidades [8, 39];
II	<i>Data-to-information conversion</i>	Recolha e processamento de dados para a extração de informação valiosa que permita compreender como opera o mundo físico [8, 39];
I	<i>Smart connection</i>	Integração dos equipamentos físicos numa rede de comunicação [8, 39].

2.2.2.2. Arquitetura RAMI 4.0

A arquitetura 5C não correspondia a toda a necessidade do contexto das fábricas inteligentes, por isso outros modelos de referência foram desenvolvidos para responder a essa limitação e promover a padronização da Indústria 4.0, tais como RAMI 4.0 e IIRA [8].

A arquitetura RAMI 4.0 (*Reference Architecture Model Industry 4.0*) surgiu em 2015 [36], com uma orientação a serviços (SOA – *Service Oriented Architecture*) que fornece uma estrutura funcional que suporta conectividade e interoperabilidade [24], tendo como objetivo definir uma estrutura de comunicação padrão dentro da unidade fabril, permitindo a integração da tecnologia IoT e dos serviços no contexto Indústria 4.0 [8, 37].

O sistema de coordenadas tridimensional, esquematizado na Figura 4, demonstra o método de implementação da indústria 4.0, que possibilita as fábricas de possuírem uma rede interconectada de produtos inteligentes, alcançando a maximização da eficiência produtiva, minimizando o custo de produção [12].

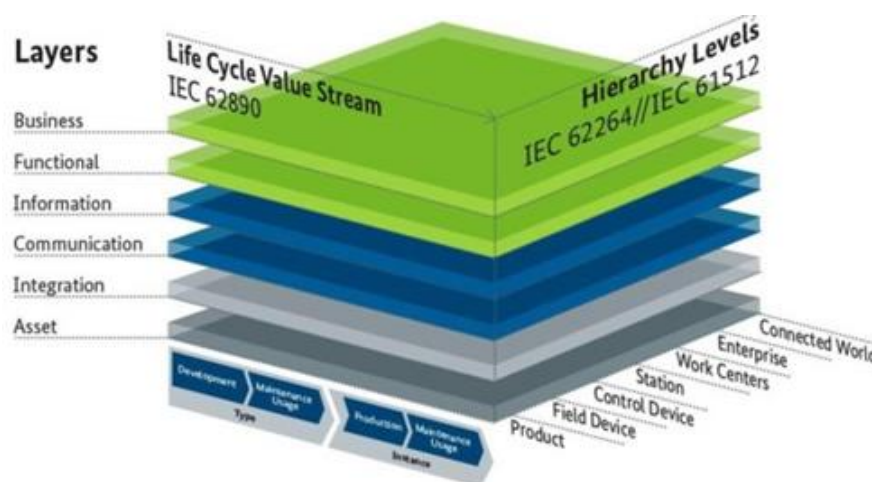


Figura 4 - Arquitetura RAMI 4.0 [7]

Este modelo é representado por três eixos com diferentes propósitos que são: o eixo “Layers”, eixo “Hierarchy levels” e o eixo “Life Cycle Value Stream”. O eixo “Hierarchy levels” representa as

diferentes funcionalidades dentro da fábrica e fornece a visão das fábricas inteligentes, o eixo “Layers” tem como objetivo descrever os ativos físicos (dispositivos, equipamentos, máquinas) da rede industrial e descreve as funções distribuídas por toda a rede demonstrando que todas as entidades comunicam entre si [12]. Por fim o eixo “Life Cycle Value Stream” representa o ciclo de vida das instalações e produtos, contendo os planos de produção do produto desde a fase de concepção até à fase de manutenção [12, 10, 11]. Dentro do eixo “Layers” podem-se encontrar várias etapas na cadeia de valor e ocupam diversos “Hierarchy levels”, constituindo a relação entre a arquitetura RAMI 4.0 e a indústria 4.0 [10].

As seis camadas da arquitetura representam a estrutura da representação das TI e são geradas com base na arquitetura 5C, sendo apresentadas na Tabela 3 [40].

Tabela 3- Camadas da Arquitetura RAMI 4.0

Camadas	Descrição
<i>Asset</i>	Corresponde às entidades no mundo real, como por exemplo componentes, hardware, documentos e trabalhadores [8];
<i>Integration</i>	Representa a ligação entre os mundos físico e digital, possibilitando a geração de eventos no mundo físico partindo do sistema virtual [8, 37];
<i>Communication</i>	Comunicação padronizada entre camadas de informação recorrendo a uma plataforma de troca de dados e a uma linguagem padrão [8, 37];
<i>Information</i>	Organização de dados em tempo real que podem utilizados pelo ativo de forma a fornecer uma visão sobre os produtos fabricados [8, 37];
<i>Functional</i>	Funções lógicas e técnicas de todos os ativos, permitindo acesso remoto e integração horizontal [37];
<i>Business</i>	Organização dos serviços para criar processos, estratégias e objetivos de negócio [8, 37].

2.2.2.3. Exemplos de Aplicação da Arquitetura CPS na Produção

Uma das arquiteturas que garantem a flexibilidade durante as operações de fabrico é a arquitetura *Multi-Agent*, cujo principal benefício é a descentralização da decisão dentro do próprio sistema de produção, tornando o sistema mais flexível e reativo em relação a problema de curto prazo [41].

Um exemplo de aplicação desta arquitetura que se encontra ativa atualmente é o processo da fábrica de montagem de Valencia da Ford Motor Company [9].

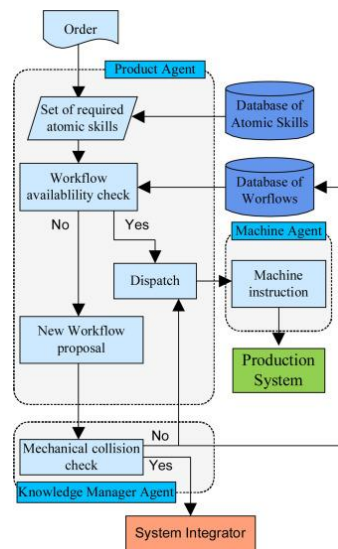


Figura 5 - Arquitetura Multi-Agent [9]

A Figura 5 representa a arquitetura *Multi-Agent* baseada em três agentes diferentes que são: o *Product Agent* (PA) que formula o fluxo de trabalho, *Knowledge Manager Agent* (KMA) responsável pela verificação física da viabilidade dos fluxos de trabalho propostos e por fim, o *Machine Agent* (MA) que traduz os fluxos de trabalho em instruções passíveis de ser interpretadas pelas máquinas. Esta arquitetura permite integrar novas competências no sistema sem alterar o código existente, uma vez que a competência é adicionada à base de dados [9].

Outra arquitetura é o *Cyber-Physical Manufacturing Cloud* (CPMC), que surgiu com o intuito de integrar a fabricação em nuvem e os CPS de modo a fornecer serviços de produção, com possibilidade de operar e monitorizar as entidades pela internet a partir de uma *cloud* [9, 42].

Um exemplo de aplicação desta arquitetura é a plataforma digital que resultou na parceria entre a KTH e a Sandvik, com o objetivo de criar um processo de produção totalmente descrito numa plataforma *cloud* tornando este processo partilhado em tempo real em qualquer lugar. Com isto é possível obter os dados relativos à produção, disponibilidade e taxa de não conformidade das máquinas em tempo real num único sistema. O CPS consegue alterar os planos produtivos previamente definidos, de forma a ajustar em função dos objetivos pretendidos pelo cliente. A intercomunicação dos constituintes e da plataforma é atingida com recurso ao IoT, bem como dos sensores aplicados nas máquinas [9].

2.3. Digital Twin

Nos dias de hoje, as empresas procuram obter ciclos de produção mais curtos, maior variedade de produtos, flexibilidade no sistema produtivo e avaliações mais eficientes da qualidade do produto com o objetivo de manter a sua competitividade no mercado. Contudo, para concretizar estes objetivos é necessário implementar novas tecnologias, de forma a analisar o volume crescente de dados do processo produtivo, exigindo a padronização da comunicação entre dispositivos numa rede IoT, facilitando a recolha e tratamento de grande quantidade de dados [16].

Os sistemas CPS, dentro do contexto da indústria 4.0, apresentam um futuro promissor pois permitem reforçar a flexibilidade dos sistemas de produção baseados na pirâmide automação. Com

os dados e comportamentos capturados pelos CPS, é possível criar uma réplica virtual de todo o sistema físico produtivo, isto é, a criação de um DT, capaz de prever e otimizar o comportamento do sistema de produção em tempo real em toda a cadeia de valor, detetar falhas na conformidade do produto, criar rotinas de manutenção e despoletar ações de melhoria [17].

2.3.1. Contextualização do Conceito DT

Inicialmente o espaço físico desempenhava um papel principal no controlo da produção no chão de fábrica, mas com a evolução das tecnologias criou-se um espaço virtual de forma a virtualizar as entidades físicas e assim cooperar com estes de forma remota [43].

O termo “DT” foi apresentado pela primeira vez por Michael Grieves em 2003, na universidade de Michigan, durante uma apresentação sobre a gestão do ciclo de vida do produto [44], tendo atualmente inúmeras aplicações em diferentes contextos, como na assistência médica, produção industrial, indústria de aviação e automóvel e construção de cidades inteligentes [34].

Nos últimos anos, várias organizações têm trabalhado no sentido de estabelecer uma definição padrão para DT, de forma a facilitar a compreensão do conceito [34]. Na

Tabela 4 são apresentadas algumas definições da tecnologia DT consoante a evolução temporal da literatura.

Tabela 4 - Definições do DT

Autores	Definição do conceito
Glassgen e stargel,2012 [45]	“uma simulação integrada num produto complexo que usa os melhores modelos físicos disponíveis, com atualização de sensores para espelhar a vida de seu gémeo correspondente.”
Grieves,2014 [46]	“um conjunto de construções de informações virtuais que descrevem completamente um produto físico. No seu melhor, qualquer informação que possa ser obtida da inspeção de um produto fabricado fisicamente pode ser obtida de seu <i>Digital Twin</i> . O modelo conceptual do <i>Digital Twin</i> contém três partes principais: produtos físicos no Espaço Real, produtos virtuais no Espaço Virtual e as conexões de dados e informações que unem os produtos virtuais e reais.
Rose net al.,2015 [3]	“um modelo muito realista do estado atual do processo e seu próprio comportamento em interação com seu ambiente no mundo real.”
Leng 2019, [47]	“Cada dispositivo físico terá o correspondente gémeo virtual como representação digital do dispositivo real, culminando nos modelos de DT. Este pode monitorizar e controlar a entidade física, enquanto este pode enviar dados para atualizar e sincronizar o seu modelo virtual.”

De acordo com a literatura, é consensual que o DT é uma representação virtual de uma entidade física específica, que usa dados coletados desse ativo para conectar a parte física e digital [48]. Fornece uma descrição física e funcional de um componente, produto ou sistema, sendo necessário, primeiramente, criar modelos virtuais com elevada fiabilidade, com o objetivo de reproduzir realisticamente as geometrias, propriedades físicas, comportamentos e variáveis do mundo físico. Resumindo, as entidades físicas e os seus modelos virtuais têm uma aparência

semelhante e os comportamentos destes são espelhados. Estes modelos otimizam operações do sistema produtivo e ajustam o processo físico por meio do feedback [44].

O gêmeo digital é quem reúne e armazena a informação necessária sobre o produto e processo de produção, tornando-as disponíveis para os sistemas autônomos que executam as etapas de fabrico [3].

O DT tem como objetivo apoiar a tomada de decisão podendo transmitir informações aos atuadores do sistema produtivo, realizar diagnósticos e prognósticos, melhorar o desempenho do sistema e otimizar as localizações dos sensores/atuadores [48]. De forma a cumprir com os resultados a que se propõe, o DT recorre a técnicas de simulação e oferece outras aplicações devido à possibilidade de gerar simulações em tempo real [34], permitindo interagir com as unidades físicas em tempo real, detetando eventuais desvios não expectáveis, gerando uma contribuição significativa para a manutenção preditiva, pois sinalizam possíveis futuras avarias (3, 49).

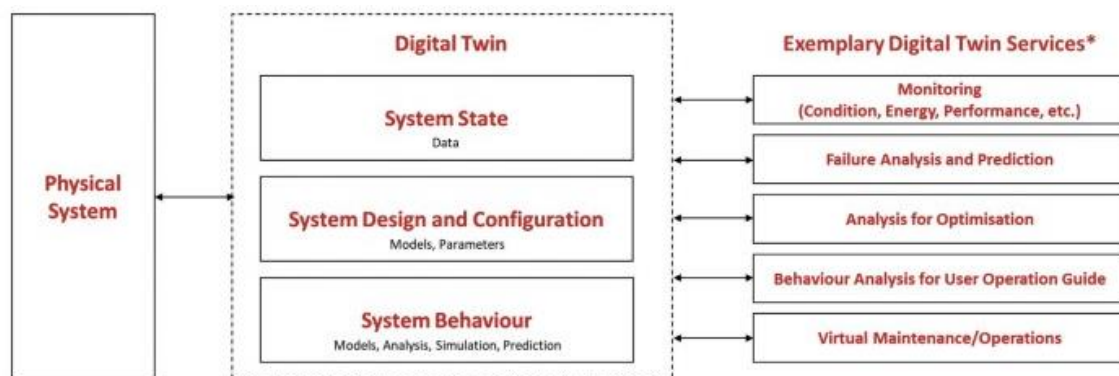


Figura 6 - Esquema de funcionamento do DT [34]

A Figura 6 pretende demonstrar que a relação entre o sistema físico e o DT é assente nos três principais constituintes: o estado do sistema associado aos dados recolhidos, a configuração do sistema associado aos parâmetros de modelação e o comportamento do sistema associado a modelos de previsão e de simulação [34].

Para além de servirem como acompanhamento de linhas produtivas existentes podem também ser utilizados para ajudar na conceção de novas linhas produtivas sem parte física concebida, uma vez que recorrendo a uma base de dados é possível prever e simular o comportamento do seu sistema antes da sua construção [48].

2.3.2. Características do DT

É uma das tecnologias digitais mais promissoras, sendo desenvolvida com o objetivo de apoiar a transformação digital e a tomada de decisão e é composta por três componentes que são a entidade física no espaço real, a representação dessa entidade no espaço virtual e a conexão de dados e informações entre essas duas entidades [50].

Na interação entre o mundo físico e o virtual, os DT podem ter diferentes níveis de integração consoante o fluxo de dados envolvido. No primeiro nível está representado o modelo digital, no segundo a sombra digital e no terceiro o DT [51].

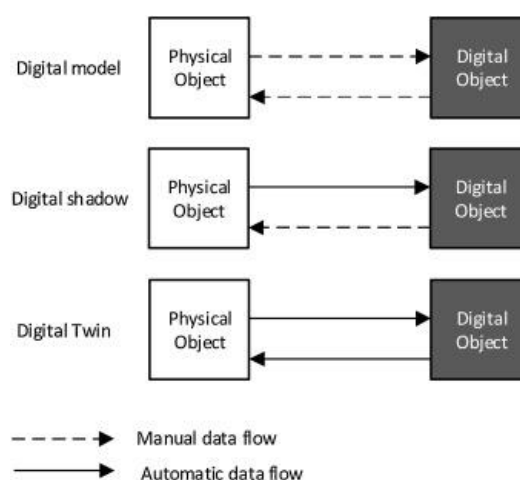


Figura 7 - Classificação do nível de integração consoante o fluxo de dados [51]

A perceção das diferenças entre estes níveis é facilmente esclarecida pela Figura 7, sendo que no modelo digital a troca de dados é feita manualmente. No caso da sombra digital a troca dos dados é automática da entidade física para o modelo digital, ou seja, este recebe os dados provenientes dos sensores. Por fim, no DT o fluxo de dados é automático e bidirecional [51].

Apesar da sua primeira aplicação ter acontecido há alguns anos na indústria aeroespacial, a implementação da tecnologia DT apresenta inúmeros desafios para as empresas devido à novidade do conceito. O conceito assenta na integração dos espaços físicos e virtuais, garantindo flexibilidade nos sistemas de produção [43], que empresas como a Siemens, General Electric e Tesla aplicam nas suas cadeias de valor [44].

A modelação de um DT preciso e eficaz em unidades fabris complexas é atualmente exigente de alcançar, visto que não existe uma uniformização das linguagens de comunicação entre os diversos modelos constituintes do sistema produtivo. Os desafios da modelação vão desde a captação correta dos dados para solucionar um problema específico até à validação destes dados, como sendo precisos e confiáveis, constituindo uma barreira transversal a todo o tipo de indústria [52]. Na Tabela 5 são apresentadas as dificuldades associadas à integração do DT no sistema produtivo.

Tabela 5 - Desafios à integração do DT

Referencia	Desafio à integração
[52, 53]	Integração de equipamentos antigos na nova rede tecnológica;
[52], [53]	Garantia da segurança e privacidade dos dados;
[52], [53]	Aquisição, armazenamento e processamento de grande quantidade de dados;
[52], [53]	Limitações de desempenho face ao exigente poder computacional associado à grande quantidade de informação;
[52], [53]	Comunicação em tempo real entre o DT e a entidade física;
[52]	Falta de especialistas na área, por ser uma tecnologia em desenvolvimento;
[52]	Falta de uniformização na área;

Apesar da existência de desafios á implementação do DT acima referido, existem também tecnologias que potenciam o desenvolvimento desta área tais como:

- ML, IA e visão computacional;
- *Big Data*;
- IoT;
- Sensores e atuadores;
- Realidade virtual e aumentada;
- Elevado poder de computação;
- Plataforma virtual (*Cloud*);
- OPC-UA – protocolo que permite a troca de dados em automação industrial;
- Técnicas de simulação.

Relativamente á gestão da grande quantidade de dados o Big data vem dar resposta a este desafio, enquanto os sensores e atuadores são responsáveis por recolher toda a informação a processar no CPS, interligado pela rede IoT. O elevado poder de computação associado às técnicas de simulação, permite analisar com precisão a elevada quantidade de informação disponível [52, 53].

2.3.3. Implementação do DT e CPS no Processo Produtivo

Os sistemas autónomos são máquinas capazes de cumprir um conjunto de tarefas de elevada complexidade e têm a capacidade de se adaptar às variações das condições ambientais, tipo de produto a ser fabricado, volume de produção e eventuais exceções que ocorram durante o processo produtivo. Para obter esta capacidade de responder a este conjunto de variáveis, estes sistemas recorrem ao uso de sensores, de forma a ter a perceção da situação atual do sistema e utilizam atuadores para executar uma sequência de ações com o objetivo de alcançar as metas impostas pelo processo produtivo [3]. A inclusão de sistemas inteligentes na produção evolui com base no conceito CPS, ou seja, sistemas autónomos que permitem a criação de cópias do processo produtivo em tempo real num ambiente digital, através da permuta de dados [17].

Na produção, tanto o CPS como DT, possuem componente física composta pelo ambiente envolvente, máquinas e humanos, e também a componente digital que engloba serviços e aplicações que permitem a otimização do sistema produtivo. A componente física capta os dados e executa as decisões provenientes da parte digital, sendo que esta é responsável pelo processamento, análise e tomada de decisão [54].

A utilização de um DT prevê a conexão ao seu gémeo físico e se o sistema produtivo possuir um CPS facilitará a sua implementação, uma vez que se trata de conectar o DT e o CPS diretamente. Atualmente, a maioria das empresas não estão equipadas com CPS pelo que a produção é planeada pelo ERP e a sequência de operações é controlada pelo MES, tornando muito complexo fazer a integração com o DT [17].

A atuação do DT inicia com a recolha e processamento dos dados característicos do caso de estudo, criando o *Digital Shadow* e, posteriormente, são gerados modelos virtuais com diferentes cenários entregues ao software de simulação, de forma a ser possível perceber qual a melhor decisão

para aquele caso. A ação definida pelo DT é comunicada ao MES, com o objetivo de ser executada no sistema físico, como se pode observar esquematicamente na Figura 8 [17].

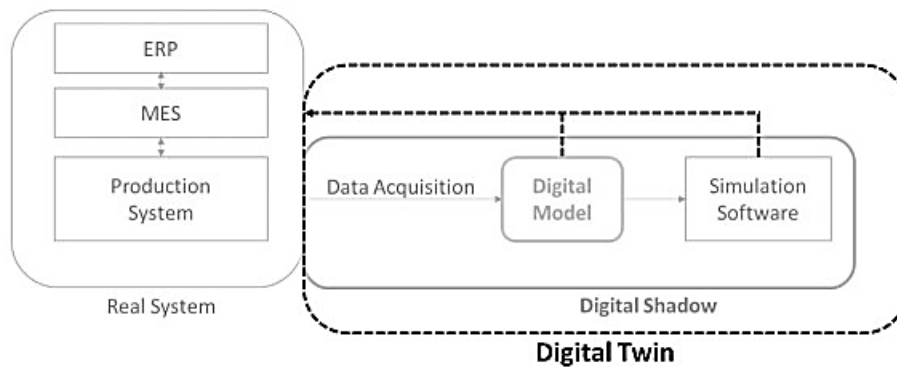


Figura 8 - Integração do DT no sistema produtivo [17]

A implementação do DT e CPS pode ser realizada em três níveis de acordo com a magnitude: entidade, sistema e sistema de sistemas (SoS). O nível entidade corresponde ao menor elemento que participa no processo produtivo, o nível do sistema representa a interconexão de vários componentes DT ou CPS, alcançando um maior fluxo de dados e de recursos. Por fim, o nível SoS representa a interconexão de vários sistemas CPS, formando uma plataforma inteligente com a integração de toda a empresa ou até a colaboração entre empresas [44].

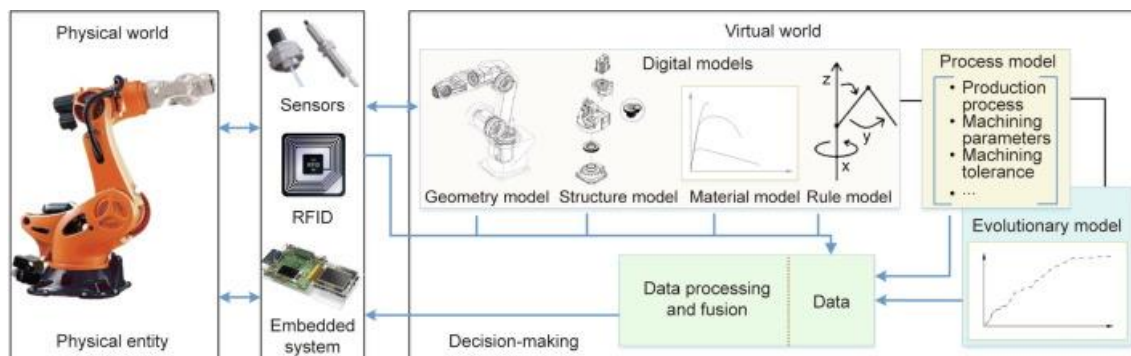


Figura 9 - Fluxograma da dependência do mundo físico, CPS e DT [44]

Na Figura 9 - Fluxograma da dependência do mundo físico, CPS e DT [44] Figura 9 pretende-se representar a relação entre o mundo físico, o CPS e o DT, evidenciando a importância da recolha dos dados para processamento por parte do sistema, que através do modelo de simulação identifica as melhores tomadas de decisão a serem executadas no mundo físico [44].

2.3.4. Propriedades do DT na Integração no Sistema Produtivo

A integração do DT no processo produtivo necessita que este possua adaptabilidade, autonomia e consciência do contexto, isto é, devem existir características que permitam ter a perceção do ambiente em que estão inseridos, ser capazes de trocar informações entre eles e de tomar decisões

em função dos objetivos pretendidos. Relativamente às propriedades apresentadas sobre os DT é necessário realizar uma abordagem mais pormenorizada de forma a identificar o potencial de cada uma das propriedades no sistema produtivo [34].

A adaptabilidade é “a capacidade de modificar o comportamento do sistema com base em situações imprevisíveis e de forma a atingir objetivos”, e envolve monitorizar o estado do sistema em tempo real e recorrendo aos CPS efetuar tomadas de decisão coerentes com a necessidade. Um exemplo é a monitorização em tempo real do estado de uma máquina pode despoletar uma ordem de manutenção e a produção ser reagendada de forma automática [34, 55].

O caminho para a autonomia é assente em três pilares que são o estado do sistema, o desenvolvimento do produto e o comportamento do sistema. O estado do sistema interliga o mundo físico e virtual e com base num sistema de malha fechada, a informação flui de forma a facilitar a tomada de decisão do DT. Este pode autonomamente influenciar o design do produto, por exemplo, adaptação física de um componente para reduzir a manutenção. As capacidades de análise e simulação avançada definem o comportamento do sistema, que em conjunto com uma elevada taxa de atualização do estado atual em tempo real e a consciência do contexto permitem alcançar previsões mais precisas, facilitando o caminho para a autonomia [34, 56].

A consciência do contexto permite personalizar o comportamento de um sistema conforme o ambiente em que ele é executado, com o objetivo de o tornar mais eficaz para a situação em concreto, processando os dados recolhidos através de um software. As preferências dos operadores nas máquinas influenciam também o contexto do ambiente. O software que analisa o contexto pode também usar informações provenientes do MES e ERP e pode também receber informação de contexto de outros DT. Ao implementar a consciência de contexto nos DT tem como consequência uma representação mais real das suas entidades físicas, incluindo o ambiente em que está inserido. O DT conhece o contexto de todos os constituintes do CPS, fornece informação a estes, bem como a outros DT, sendo benéfico para a tomada da melhor decisão para todo o contexto do grupo [34].

2.3.5. Casos de Estudo

Na Tabela 6 são apresentados alguns exemplos de casos de estudo encontrados na pesquisa bibliográfica e que demonstram os benefícios de aplicação do DT.

Tabela 6 - Casos de estudo com aplicação do DT

Referencia	Descrição
[57]	Aplicação do DT para sistemas de cooperação entre robot e homem em posto de trabalho produtivo. Diz respeito a um posto de trabalho com algumas operações de movimentação e transformação, as quais algumas destas foram transferidas para o robot como movimentação e aperto de parafuso. Neste caso o DT o comportamento do sistema físico através da criação de um modelo virtual preciso atualizado em tempo real e utilizado como plataforma de simulação;
[58]	Aplicação do DT para otimização dos tempos de produção ainda na fase de desenvolvimento da linha produtiva, mais especificamente de uma linha de montagem de satélites. Através da utilização do DT o tempo de montagem foi reduzido em 55% quando comparado com o tempo convencional;

[59]	A aplicação do DT para otimização de um circuito logístico, de um cais de contentores. As estratégias de otimização provenientes do DT ajudaram a melhorar a eficiência de gestão;
[60]	Aplicação do DT para gestão da integração de uma linha produtiva, das matérias provenientes de diferentes fornecedores, que se mostrou fiável para atingir os objetivos de melhoria;
[61]	Aplicação do DT para simulação em redes de telecomunicações associadas á rede ferroviária. O caso de estudo demonstrou que a introdução do DT pode aumentar o número de conexões bem-sucedidas, porém pode levar a interações desnecessárias.

2.4. Personalização do Produto

As tecnologias IoT, ML e CPS criam uma nova era de transformação digital, melhorando a flexibilidade das fábricas inteligentes. Estas possuem uma linha de produção baseada em CPS, garantindo um conjunto de requisitos específicos para produzir produtos personalizados, sendo um elemento essencial na transformação da produção inteligente [62]. Na procura pela personalização do produto é necessário utilizar métodos que permitam a versatilidade do produto, como por exemplo a criação de um design adaptável para diferentes requisitos. O produto deverá ser modular de forma a poder ser aplicado em situações distintas com reduzidas alterações, promovendo redução de custos de projeto e de produção [63].

De forma a viabilizar o desafio da customização em massa, impõe-se a necessidade de produção em lotes pequenos com mix de produtos diversificados, exigindo um canal de comunicação entre os requisitos do cliente e a capacidade de produção para realizar esses pedidos personalizados [64]. Durante a transformação das fábricas tradicionais em inteligentes, passou-se a dar maior ênfase no valor do cliente [62].

2.4.1. Customização em Massa VS Customização Inteligente

O conceito “customização” é definido como a estratégia de fornecer produtos e serviços que apresentem as necessidades diversificada pretendidas pelos clientes [65]. Com o avanço da IoT, há uma evolução crescente dos dados gerados pelos sistemas produtivos que em conjunto com as técnicas de processamento de dados está a transformar a customização em massa para um conceito de tomada de decisão mais inteligente, autónomo e racional, isto é, a customização inteligente (66, 67). Contudo existe ainda insuficiência de informação para responder aos requisitos personalizados, visto que podem continuar a faltar dados sobre o mundo real ou os dados existentes sobre os requisitos dos clientes podem ser superficiais e fragmentados [66].

A customização em massa diz respeito à entrega de produtos com características específicas que correspondem às necessidades do cliente, garantindo a eficiência e custo de produção próximo da produção em massa. De forma a garantir sucesso na vertente da customização é necessário adotar algumas estratégias: modularidade do produto, cadeia de fornecimento flexível e sistemas de produção mais avançados [66, 68, 69].

Na Tabela 7 realiza-se uma análise comparativa entre os dois tipos de customização, em massa e inteligente.

Tabela 7 - Customização em massa VS Customização inteligente

	Customização em Massa	Customização Inteligente
Tomada de decisão	Baseada na experiência e conhecimento dos designers [66];	Baseada na informação recolhida em bases de dados (<i>Big Data</i>), como plataforma e-commerce e redes sociais [66], [70]; Tomada de decisão mais eficiente [66, 70];
Resposta à procura	Passiva, levando à pressão nas entregas por parte dos fornecedores [66];	Preditiva e pró-ativa [66]; Cadeia de fornecimento mais ágil assente na disponibilidade de informação [66, 67];
Relacionamento com os clientes	Participação limitada do cliente [66];	Interação com o cliente, aproximando-se com maior facilidade dos requisitos impostos por estes [66, 67];

2.4.2. Aplicação do DT na Customização Inteligente

A implementação do DT beneficia as organizações, uma vez que otimizam a produção, reduz o tempo de inatividade do sistema de produção e, como consequência, diminui o prazo de entrega [52] e garante a flexibilidade necessária para responder às necessidades dos clientes. O DT pode ser aplicado nas diferentes etapas do ciclo de vida do produto, desde projeto, aquisição, produção e serviço, apresentado na Tabela 8 [43].

Tabela 8 - A influência do DT nas diferentes etapas do ciclo de vida do produto

Etapas	Descrição
Projeto	Simulação de vários cenários de utilização do produto por parte do cliente, após carregamento dos dados no espaço virtual [66, 71];
Aquisição	Integração dos fornecedores orientando a estratégia de aquisição, em tempo real, conforme a procura, o nível de stock e a tendência de mercado, garantindo flexibilidade na produção [66];
Produção	No espaço virtual estão acessíveis as informações necessárias á simulação da melhor sequência de produção como a disponibilidade dos recursos e a eficiência dos equipamentos. Possibilita o planeamento da produção para cumprimento dos padrões de qualidade e gestão de custos [66, 71];

Serviço	Monitorização do produto sensorizado, oferecendo um serviço altamente personalizado para aumentar a satisfação do cliente [66, 71].
---------	---

2.4.3. Produção Descentralizada

A descentralização é uma característica chave das fábricas inteligentes, em que nenhuma entidade integrante da tomada de decisão possui todas as informações necessárias para fornecer uma decisão final [72]. Vários estudos confirmaram a viabilidade da computação em nuvem em empresas de produção, bem como em plataformas de personalização do produto [32], constituindo uma tecnologia central à produção em nuvem que será uma tendência inevitável a curto prazo [73].

Numa produção descentralizada, os recursos estão distribuídos geograficamente e interconectados entre si através de redes colaborativas com capacidade de tomar as suas próprias decisões. O CPS facilita a integração de recursos numa única entidade, integrando numa arquitetura baseada em serviço de nuvem com comunicação entre todas as entidades. As arquiteturas de sistema modulares, os modelos de IA em conjunto com a evolução das tecnologias digitais apoiaram o surgimento do sistema de produção descentralizada [26].

As plataformas CPS integram, efetivamente, fabricantes, fornecedores, consumidores, desenvolvedores e outros participantes e usam o fluxo de informações para direcionar o fluxo de tecnologia, fluxo de capital e fluxo de material para colaborar em negócios desenvolvidos na plataforma. Estas plataformas realizam a alocação dinâmica da rede de recursos e promovem a produção em rede, que pode ser descentralizada [26].

A introdução do cloud manufacturing permite que diferentes empresas com localizações geográficas distintas, partilhem informação sobre procura, desempenho e disponibilidade das máquinas integrantes das linhas produtivas. Isto resulta numa melhoria contínua coletiva do produto, com o objetivo de tornar a produção mais sustentável, mais resiliente, minimizar os desperdícios, culminando numa otimização da cadeia de valor [74].

O DT é um pilar para a fabricação compartilhada que prevê a partilha de recursos ou serviços de forma a satisfazer as necessidades de produção garantindo otimização da produção tendo em conta o parque de máquinas, a localização geográfica e a disponibilidade dos equipamentos. Este tipo de produção requer uma monitorização em tempo real dos recursos constituintes da cadeia de valor. Devido ao grande volume de dados recebidos pelo DT é necessário garantir uma abordagem descentralizada com compartilhamento de dados entre servidores conectados (pares) em que nenhum deles tem o controlo centralizado do tratamento dos dados [75], [76], forçando o aparecimento do *Edge DT*. Este está associado a uma etapa específica do ciclo de vida do produto e é responsável pela gestão dos dados recolhidos relativos a essa etapa, reduzindo a quantidade de tráfego de dados entre o *shopfloor* e a *cloud*, uma vez que armazena os dados de forma local, realiza o seu processamento e apenas transfere para a nuvem os resultados que influenciem o processo. As informações provenientes dos diferentes *Edge DT* são reunidas em *cloud* para que exista a interligação das diferentes etapas do processo, de forma que outros aplicativos possam aproveitar os dados do ciclo de vida do produto [77].

A produção em nuvem é um novo modelo promissor, centrado no cliente e orientado pela procura, que permite acesso conveniente a conjunto de recursos de computação, uma vez que cada vez mais os clientes desejam ter a possibilidade de interferir no processo de design do produto e acompanhar a produção em tempo real [73,78]. Esta tecnologia facilita a personalização de produtos complexos e gestão eficaz de serviços descentralizados, devido às suas características de escalabilidade e flexibilidade de recursos. Torna acessível a um conjunto de stakeholders, um grupo de recursos de fabricação e planeamento de produção através de plataformas de personalização [78,79].

A diferenciação atrasada do produto (DPD) é uma tentativa proposta na literatura, profundamente ligada ao cloud manufacturing, que visa atrasar ao máximo a customização do produto, de forma a reduzir o lead time de produção, conseguindo fornecer maior variedade de produto com eficiência. Promove a divisão do processo em duas etapas: fase genérica e a fase personalizável, sendo o ponto chave definir o momento ótimo de transição entre as duas, garantindo um baixo custo operacional e curto prazo de fabrico [80].

3. DESENVOLVIMENTO

A digitalização da produção surge como uma oportunidade de resposta à procura pela customização do produto e permite que pequenos fabricantes possam personalizar os produtos, tendo a oportunidade de competir com organizações maiores.

Face a situação atual, surge a necessidade da criação de uma aplicação digital, tendo como foco a descentralização da produção, que se traduz na criação de uma plataforma de interação entre os recursos presentes em diversas localizações e os investidores que procuram o desenvolvimento dos seus produtos. Um dos pilares que tornam possível a solução concebida é o IoT, uma vez que permite realizar a interligação entre os recursos a controlar e os gestores.

A descentralização da produção, bem como o acesso livre à informação são dois assuntos contemporâneos, que visam aumentar o controlo produtivo e a qualidade do produto. O conceito da descentralização associada à arquitetura da plataforma proposta permite realizar a alocação das várias etapas de produção nos diferentes recursos distribuídos geograficamente. Do ponto de vista económico, a plataforma permite que a concretização do produto seja exequível sem investimento inicial avultado em máquinas, pois há um aproveitamento dos múltiplos recursos já presentes na sociedade, promovendo a sustentabilidade pela partilha de equipamentos.

A utilização e exploração de ferramentas *opensource* está cada vez mais na ordem do dia, uma vez que demonstram ser ferramentas económicas, mas igualmente eficazes, porém podem ser mais exigentes para o utilizador, pois não se trata de uma solução dedicada.

3.1. Arquitetura Proposta

A adoção dos conceitos inerentes à indústria 4.0, como a descentralização e personalização da produção, permite que as organizações se mantenham competitivas perante as mutações do mercado, pelo que a construção de uma arquitetura que promova a conectividade, comunicação entre recursos e a recolha de dados do ambiente envolvente é essencial para criar oportunidades de desenvolvimento.

O foco principal da indústria 4.0 é o desenvolvimento de soluções que têm como base a criação de procedimentos e processos inteligentes de produção através da IoT, aliados ao conceito da descentralização. O avanço neste sentido só é possível através da combinação desta tecnologia com outras já existentes, contudo deve ocorrer uma contextualização em vista à melhoria global do sistema. Para além destes recursos tecnológicos é conveniente ter em conta que as novas políticas económicas e sociais têm um grande impacto na aplicação deste novo conceito, destacando-se o rápido desenvolvimento dos produtos, a procura por soluções customizadas e pela sustentabilidade.

O principal objetivo do desenvolvimento desta arquitetura é a construção de uma fábrica digital, permitindo um conceito virtual de uma rede de subcontratação de recursos que possuem uma identidade própria, possibilitando a sua integração na construção das linhas produtivas e consequentemente a sua otimização.

A proposta desta arquitetura permite a construção de uma rede de produção flexível, independentemente da localização geográfica dos intervenientes no processo produtivo,

permitindo uma visão global desta e conseqüentemente melhores tomadas de decisão face às exigências dos clientes.

A proposta de valor deste conceito é o desenvolvimento de uma plataforma de comunicação baseada na arquitetura e que visa descentralizar a produção, avançando para a personalização do produto através da partilha de recursos disponíveis em locais diferentes. A criação da rede global de recursos implica o acompanhamento em tempo real do seu funcionamento e disponibilidade, exigindo a definição de um DT para cada recurso, permitindo uma rastreabilidade descentralizada da linha de produção. As oportunidades de melhoria que esta filosofia visa proporcionar são a disponibilidade de recursos com um menor investimento, o apoio à sustentabilidade, uma maior rastreabilidade do processo promovendo o aumento da qualidade do produto final e o desenvolvimento de um ambiente virtual capaz de simular vários cenários de produção.

Na Figura 10 estão representados todos os níveis da arquitetura proposta, sendo explicado em detalhe o papel de cada um na arquitetura proposta. A arquitetura desenvolvida evidencia o pensamento da solução sendo composta por 3 níveis interdependentes, fundamentais para a construção de uma rede conectada e capaz de agregar os intervenientes na cadeia de valor.

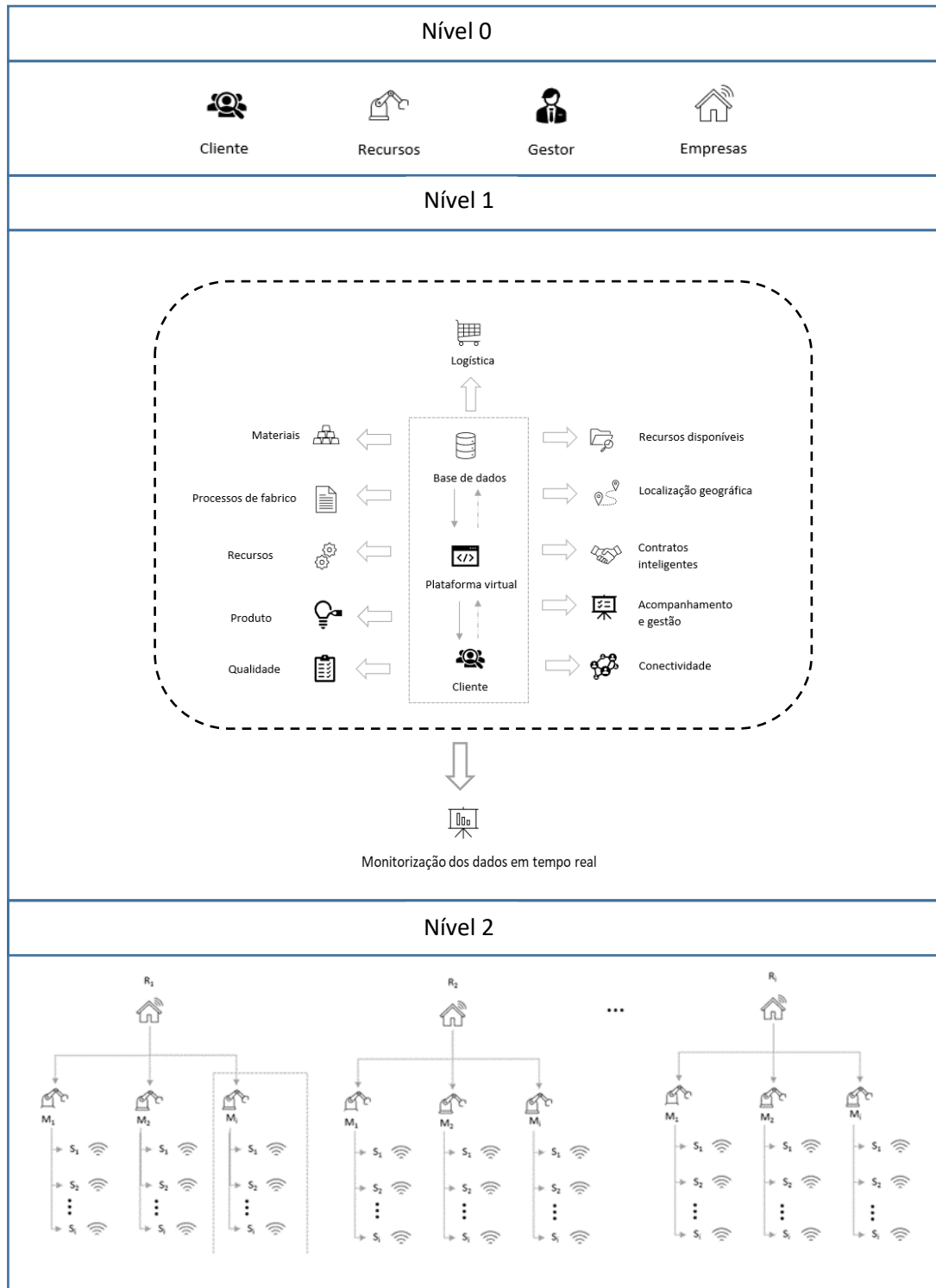


Figura 10 - Arquitetura proposta

De uma forma geral, o nível 0 representa a base essencial ao funcionamento da plataforma, constituída pela interação virtual dos fornecedores, clientes e recursos. A relação entre estes stakeholders origina uma rede interconectada e dotada de múltiplas dependências entre si com uma nova perspetiva de negócio e serviços. Relativamente ao nível 1, este representa os fatores essenciais à definição da linha produtiva digital de um dado produto, desde a sua definição até à subcontratação dos recursos inerentes ao fabrico do produto. Por último, o nível 2 é responsável

por criar uma única rede de comunicação agregadora de recursos, onde há uma partilha dos dados provenientes dos sensores, em tempo real, permitindo o acompanhamento de toda a linha produtiva, promovendo a transparência de informação ao longo de todo o processo.

3.1.1. Nível 0 – Intervenientes na arquitetura proposta

Atualmente, a customização do produto é cada vez mais procurada pelos clientes, obrigando ao desenvolvimento de soluções e mecanismos que permitam assegurar o fornecimento deste tipo de serviços personalizados.

Os participantes esquematizados na Figura 11, que integram esta arquitetura, são essenciais para o alcance de todo o potencial existente nesta, uma vez que estes irão ser peças fulcrais para cumprir os requisitos inerentes ao produto, definidos pelo cliente. Embora os participantes tenham o seu contributo bem definido durante a construção do ciclo produtivo, estes apresentam um objetivo comum que é a melhoria contínua do processo, como a diminuição do prazo de entrega e o aumento da qualidade do produto entregue ao cliente.

O cliente é responsável por adjudicar a obra ao gestor que acha mais adequado consoante o tipo de produto pretendido, sendo este responsável pela definição de toda a linha produtiva necessária à construção do produto e também a realização da ficha identidade de cada um. Por fim, os recursos, elemento central, são equipamentos disponibilizados, distribuídos do ponto de vista geográfico que permite ao gestor materializar o produto, estando patente a descentralização da produção. Estes são introduzidos na plataforma pelos detentores destes, sendo especificadas todas as suas características como por exemplo a capacidade produtiva e parâmetros que são possíveis de ser monitorizados a partir da plataforma, assumindo elevada importância na fase da escolha do recurso. As características dos equipamentos poderão ser iguais, mas podem estar sensorizados de formas diferentes consoante a necessidade de cada produtor, e que por isso devem ser descritos na plataforma indicando o tipo de monitorização possível.

A evolução da tecnologia e a implementação da IoT permite criar uma única rede de comunicação, independentemente da localização do recurso, em que há uma monitorização do ciclo produtivo através da implementação de sensores garantindo um sistema rastreável, flexível, controlável e transparente.

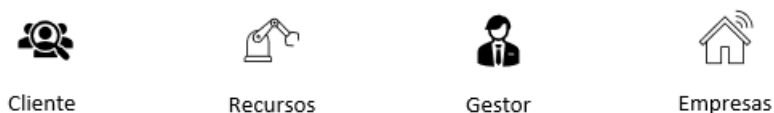


Figura 11 - Nível 0 da arquitetura proposta

3.1.2. Nível 1 – Elementos integrantes da arquitetura proposta

Os conceitos associados à indústria 4.0 permitem impulsionar a customização do produto a partir da construção de uma rede de produção caracterizada pelo desenvolvimento de ferramentas, que integram os elementos fundamentais à caracterização do produto. O principal objetivo da customização é responder a uma necessidade específica de um consumidor, implicando uma solução singular e única, conseguida através da implementação desta arquitetura.

A palavra “conectividade” descreve o nível 1, que representa a base da solução proposta, uma vez que representa a interligação de todos elementos necessários ao desenvolvimento do processo produtivo, aglomerando todos estes na plataforma virtual.

A aplicação do nível 1, esquematizado na Figura 12, implica o desenvolvimento de uma ferramenta robusta e otimizada que apenas é conseguida ao longo do tempo, pois implica a construção de uma base de dados complexa e dotada de informações provenientes dos processos produtivos, sendo essencial para a agilização e otimização do sistema. Estes dados, para além de numéricos provenientes dos sensores instalados nos recursos, são também descritivos uma vez que armazenam as características e operações de fabrico de cada produto originando a sua ficha identidade.

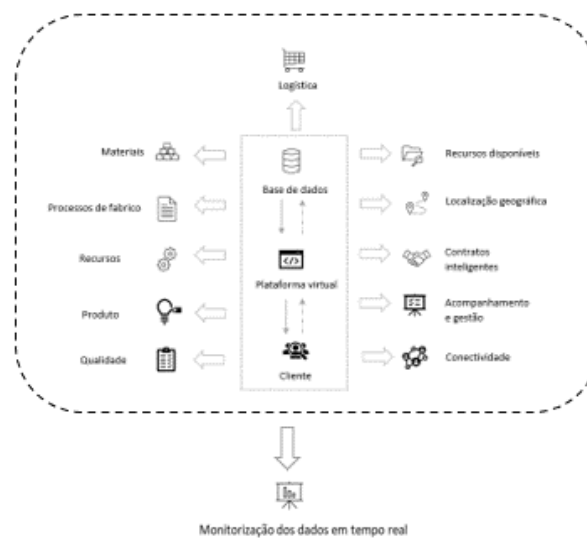


Figura 12 - Nível 1 da arquitetura proposta

A digitalização e o desenvolvimento do ciclo produtivo, com base nesta arquitetura, requerem a elaboração de um conjunto de etapas, esquematizadas na Figura 13, essenciais à construção da ficha identidade de cada produto.

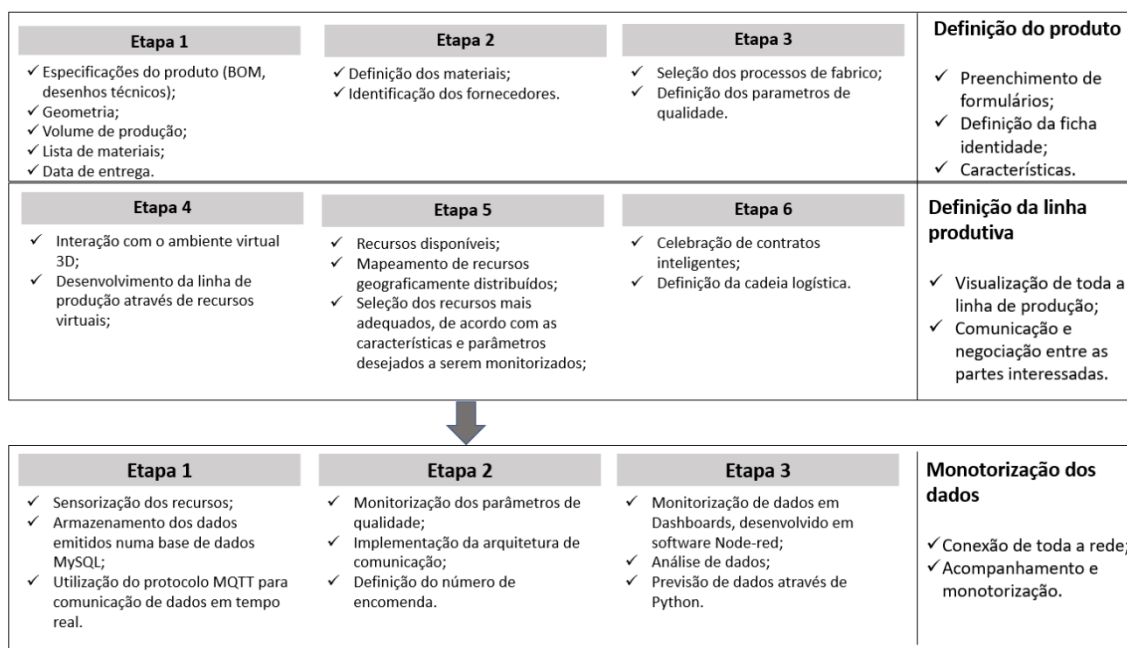


Figura 13 - Fluxograma da definição do produto

A aplicação da descentralização e o desenvolvimento do processo produtivo, com base na subcontratação, inicia-se com a definição do produto por parte do cliente onde são identificadas as suas características principais, para posteriormente o gestor iniciar a digitalização do produto, desde a seleção dos recursos a usar até à monitorização da linha produtiva, criando assim a fábrica digital.

Esta arquitetura propõe o uso de contratos inteligentes como um meio instantâneo para finalizar a contratação de cada recurso, sendo que este não será abordado em detalhe nesta proposta.

3.1.3. Nível 2 – Estrutura de comunicação da arquitetura proposta

A era da indústria 4.0 está associada a requisitos, que tem em vista a melhoria da qualidade, aumento da flexibilidade e diminuição de custos nos sistemas produtivos. A interligação digital de sensores, instrumentos e outros componentes de rede, no âmbito da IoT permite a criação da fábrica digital.

Atualmente, a IoT representa um papel fundamental na construção de uma fábrica digital pois permite a criação de um sistema interligado capaz de efetuar a partilha de dados independentemente da localização geográfica dos recursos.

A arquitetura de comunicação proposta garante que todas as informações relevantes para a fabricação de um produto, tais como atrasos na entrega ou até parâmetros desajustados sejam partilhados através de uma rede sensorizada interconectada, permitindo uma monitorização total e precisa do ciclo produtivo, desenvolvendo um sistema robusto de rastreabilidade.

Neste nível, esquematizado na Figura 14, é definido o método usado para garantir a comunicação das máquinas e como atingir os objetivos desta plataforma como o acompanhamento virtual da produção por parte do gestor e ainda a implementação de dashboards para o controlo dos

parâmetros que possam influenciar a qualidade dos componentes produzidos pelos recursos escolhidos. A necessidade de recorrer à sensorização dos recursos é obrigatória, requerendo protocolos de comunicação para garantir a interação entre os dispositivos. Este protocolo é essencial para garantir a obtenção de dados de e para dispositivos em rede independente do lugar do mundo onde estejam.

A implementação deste nível permite rastrear o produto ao longo da linha produtiva, isto é, controlar o ambiente produtivo bem como a quantidade produzida até à data, sendo isto apenas possível se as máquinas pertencentes à linha produtiva estiverem sensorizadas para este propósito. Os dados recolhidos dos recursos são armazenados numa base de dados, permitindo o agrupamento destes por categoria, sendo assim possível uma análise detalhada do seu comportamento face às operações de fabrico associadas, contribuindo para uma escolha inteligente e sólida dos recursos a utilizar e assim melhorar a cadeia de valor de um dado produto.

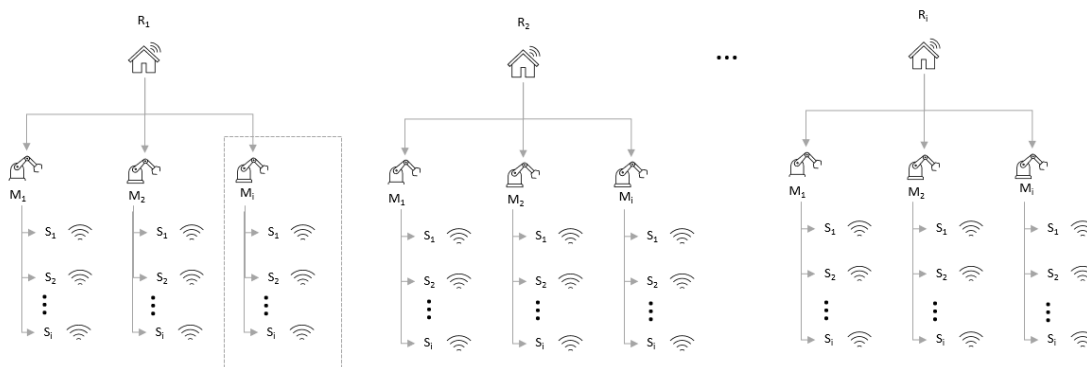


Figura 14 - Nível 2 da arquitetura proposta

3.2. Implementação da arquitetura proposta: Fábrica Digital

A fábrica digital implica a criação de uma rede de modelos digitais que replicam os modelos reais, tanto a nível comportamental como visual, permitindo a visualização 3D de todo o sistema produtivo.

A implementação da arquitetura proposta baseia-se no desenvolvimento de uma plataforma virtual capaz de efetuar a definição do produto através da criação de formulários, realizar a escolha dos recursos para integrar na linha produtiva e criar uma arquitetura de comunicação entre máquinas, de forma a garantir a rastreabilidade em tempo real dos parâmetros de produção. Este desenvolvimento permitiu explorar o conceito do Digital Twin, tendo em vista a proposta de soluções que contribuam para a digitalização e modernização da gestão da produção, por aplicação dos conceitos IoT e indústria 4.0.

Atualmente, é necessário desenvolver ferramentas de apoio às PMEs com o objetivo de competirem com as grandes empresas, sendo que esta plataforma apresenta uma proposta de valor uma vez que permite apoiar a personalização dos produtos.

3.2.1. Implementação da arquitetura de comunicação

A rastreabilidade da linha produtiva é garantida através da construção de um protocolo de comunicação entre as máquinas intervenientes no processo produtivo e o gestor, garantindo o acompanhamento do processo em tempo real.

A proposta desta arquitetura assenta na agregação de múltiplos conceitos e ferramentas, que permitem a construção de um sistema de monitorização e controlo, como o MQTT Broker, MySQL e Node-Red, sendo que todas estas são ferramentas open-source. Para melhor entendimento, irá ser realizado um breve resumo de cada uma, como o objetivo de clarificar a função de cada uma.

MQTT BROKER

O broker usado nesta arquitetura foi o Eclipse Mosquitto, sendo uma ferramenta open-source e de fácil utilização para um utilizador comum, definido uma porta de comunicação no computador para que possa ocorrer a transferência de informação proveniente dos vários sensores. Este é visto como o elemento central da arquitetura, pois atua como intermediário entre Subscribers e Publishers, garantindo a passagem da mensagem entre os sensores virtuais, o software node-red e a base de dados MySQL.

MYSQL

A evolução tecnológica assenta na evolução das tecnologias de comunicação, tais como redes de comunicação e linguagens de programação, potenciando a difusão da informação. As tecnologias de informação foram melhoradas para permitir a utilização simultânea do mesmo recurso gerando uma maior quantidade de dados, havendo necessidade de os armazenar numa base de dados.

Na arquitetura desenvolvida, a base de dados é componente fundamental pelo que foi selecionado o MySQL por ter flexibilidade, escalabilidade e simplicidade de implementação. O MySQL é um software suportado em várias plataformas e tem como princípio a construção de tabelas, onde os atributos são registados.

FERRAMENTA NODE-RED

De forma a atingir a melhoria da qualidade do produto e transparência na informação partilhada foi utilizada a ferramenta node-red para construir um dashboard que apresentasse os dados em tempo real pelos sensores instalados nas máquinas. Esta ferramenta constitui um elemento intimamente ligado à implementação do IoT em código aberto, que através de um fluxo de blocos estabelece a comunicação entre dispositivos.

3.2.1.1. Desenvolvimento da Arquitetura de comunicação proposta

A arquitetura proposta para a implementação do nível 2, esquematizada na Figura 15, permite agregar todas as ferramentas mencionadas anteriormente de forma a permitir a comunicação entre máquinas. Como se pode observar nesta arquitetura, o protocolo de comunicação MQTT representa o elemento central e é responsável por realizar a “ponte” entre os sensores e as ferramentas Node-red, que permite o desenvolvimento de dashboards de monitorização dos

dados em tempo real e MySQL que armazena dados emitidos pelos sensores para tratamento e análise. Este tipo de solução poderá ser enquadrado numa realidade de produção descentralizada.

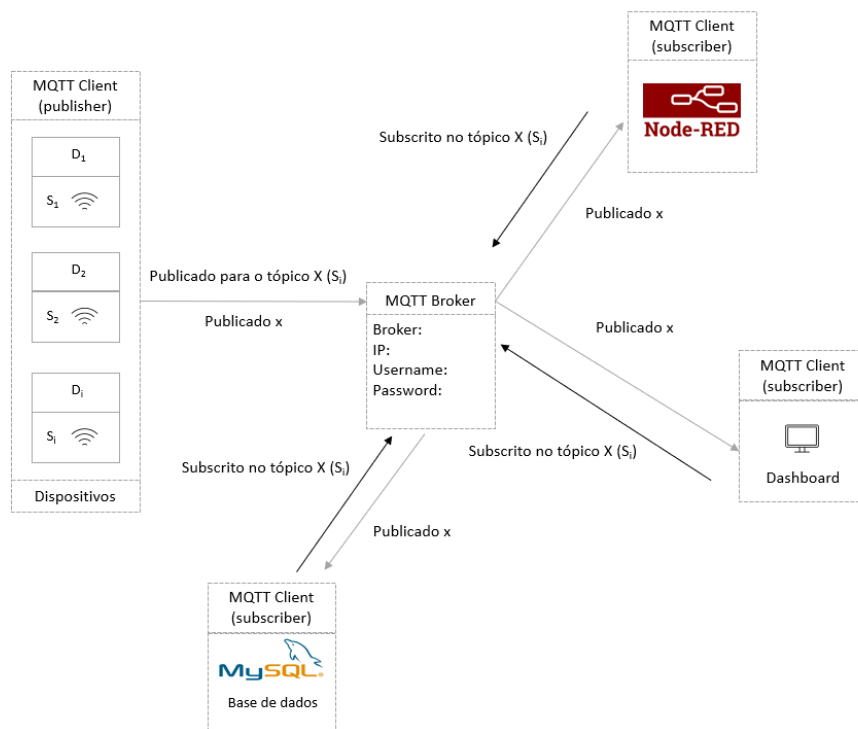


Figura 15 - Arquitetura de comunicação

Como já referido, primeiramente foi necessário instalar o protocolo MQTT Mosquitto de forma a permitir a comunicação entre os softwares. De forma a testar esta arquitetura, desenvolveu-se em primeiro lugar um código em Python, esquematizado na Figura 16, com o objetivo de replicar os sensores S_i e estabelecer a ligação apresentada na Figura 15.

```

import paho.mqtt.client as mqtt
import random
import time
import socket

s = socket.socket()
Host = "localhost"
port = 1883
s.connect((Host, port))
mqttBroker = '127.0.0.1'
client = mqtt.Client("Temperature_Inside")
client.connect(mqttBroker)

x = 0
while True:

    randomNumber = random.randint(300, 303)
    x = randomNumber + x
    client.publish('PRODUCAO', x)
    time.sleep(2)
    print(x)
    y = (x/3500)*100
    y = round(y,2)
    client.publish('Porcentagem', y)

```

```

import paho.mqtt.client as mqtt
import random
import time
import socket

s = socket.socket()
Host = "localhost"
port = 1883
s.connect((Host, port))
mqttBroker = '127.0.0.1'
client = mqtt.Client("Temperature_Inside")
client.connect(mqttBroker)

while True:

    randomNumber = random.randint(200, 210)/10
    client.publish("TEMPERATURA", randomNumber)
    time.sleep(2)
    print(randomNumber)

```

Run: main	Value
20.4	
20.5	
20.6	
20.2	
20.0	
20.1	
21.0	
20.9	
20.5	
20.8	

Figura 16 - Sensores desenvolvidos em Python

Na Figura 17 está representado o código que permite a criação de uma tabela no software MySQL, para armazenamento dos valores recolhidos.

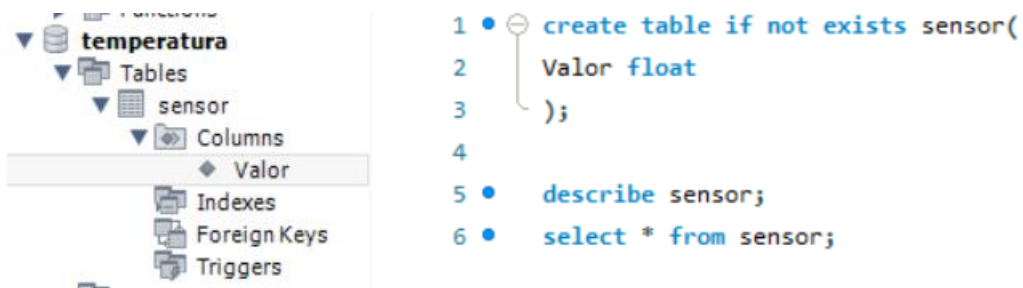


Figura 17 - Base de dados no MySQL

A Figura 18, apresenta toda a arquitetura definida no Node-Red, desde a recolha, armazenamento, processamento e exibição de dashboards de controlo.

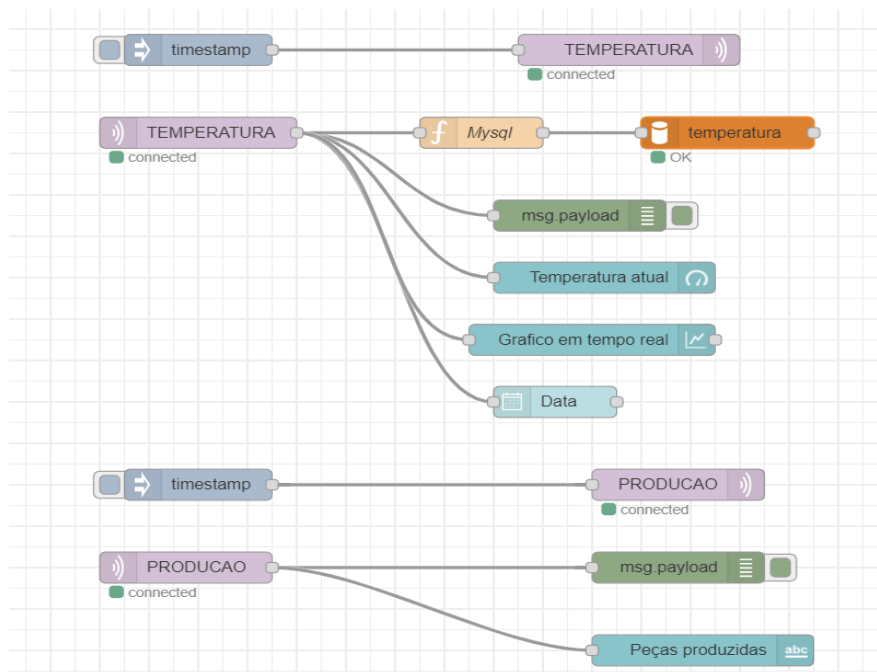


Figura 18 - Arquitetura Node-Red

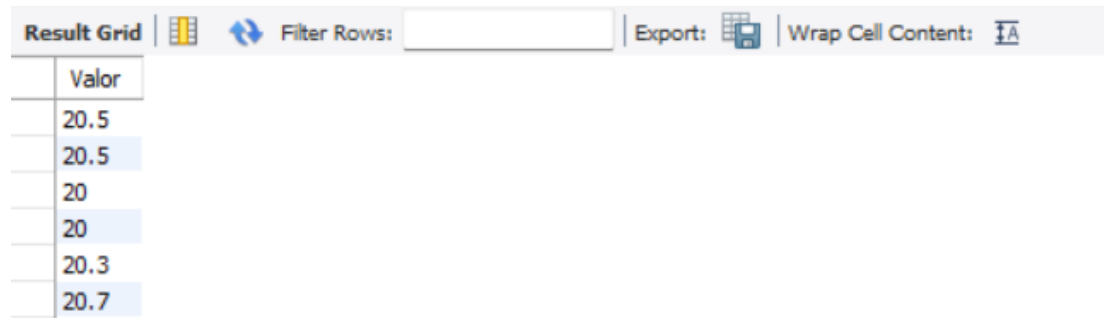
Para concluir a ligação com a base de dados, foi necessário desenvolver uma função, esquematizada na Figura 20, que permita a transferência da informação recolhida pelos sensores para esta.

```

1 msg.topic = "INSERT INTO sensor (Valor) VALUES ( '" + msg.payload + "' );"
2
3
4 return msg;

```

Figura 19 – Integração do Node-red e MySQL



The screenshot shows a 'Result Grid' interface with a toolbar at the top containing 'Filter Rows', 'Export', and 'Wrap Cell Content' options. Below the toolbar is a table with a single column labeled 'Valor' containing the following data points:

Valor
20.5
20.5
20
20
20.3
20.7

Figura 20 - Base de dados

O passo seguinte, é a criação de um dashboard de controlo que permita, de forma intuitiva, analisar a informação recolhida pelos sensores. O dashboard do teste realizado, exemplificado na Figura 21, é constituído por duas medições diferentes: uma da temperatura e a outra do número de peças produzidas. Na parte associada á temperatura existe um gráfico que evidencia a variação da mesma num certo período e um código de cores para melhor controlo dos mesmos. Na parte associada ao indicador da produção é apresentada algumas das características referentes à ordem de fabrico como a data de início prevista, a data de fim prevista, o número de peças fabricadas até ao momento e a quantidade objetiva da obra.



Figura 21 - Dashboard criado no node-red

3.2.1.2. Aplicação prática da arquitetura proposta

Após testar o funcionamento da arquitetura desenvolvida, foi implementado um sensor, esquematizado na Figura 22, que permite controlar a temperatura e humidade ambiente, recolhendo informação de um cenário em tempo real. Esta implementação tem como objetivo comprovar o potencial do Arduino com baixo investimento cumprindo a finalidade de monitorização de um ambiente.

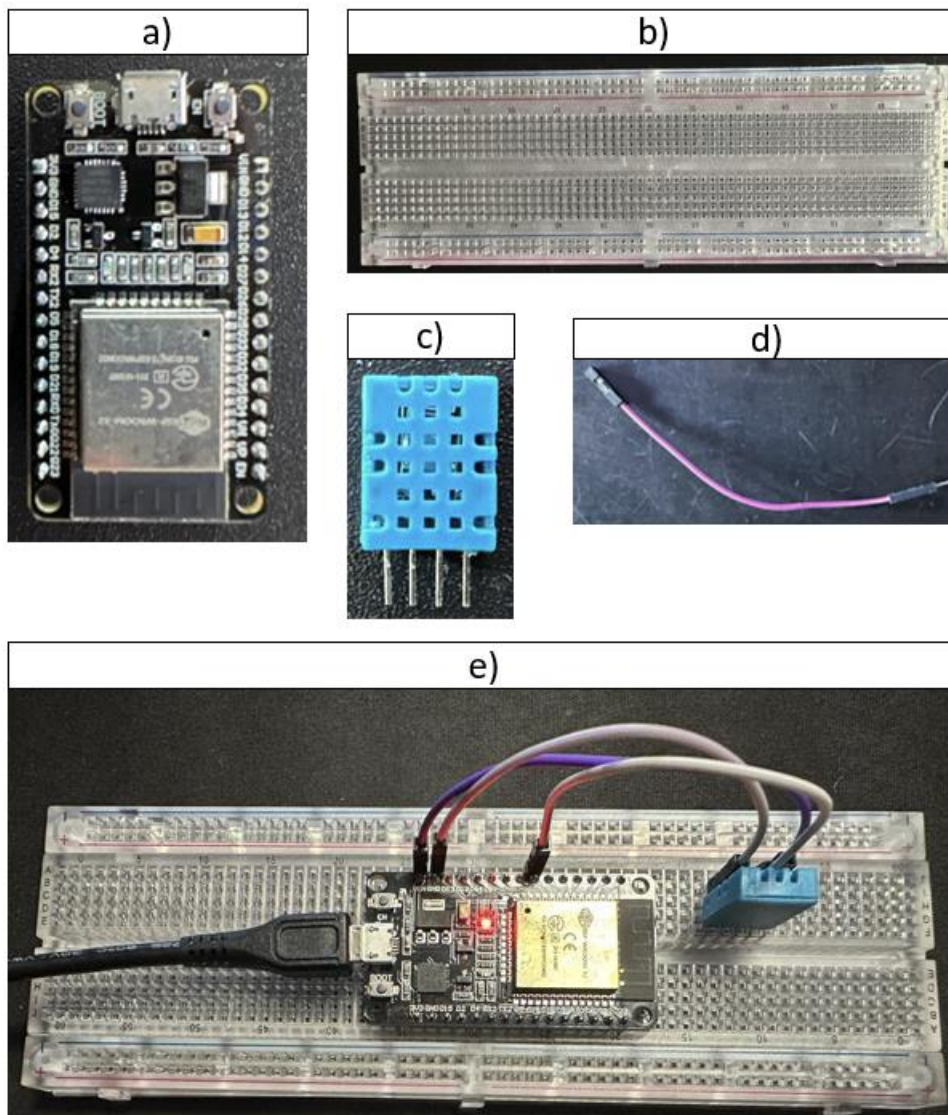


Figura 22 – a) Placa de desenvolvimento ESP32; b) Placa de ensaio Breadboard; c) Sensor de temperatura e humidade DHT11; d) Cabo jumper macho-macho; e) Integração de todos os componentes;

A integração do sensor na arquitetura veio substituir os valores aleatórios gerados por código Python a título exemplificativo por uma aplicação real. Nesta aplicação prática demonstrou-se a viabilidade do Arduino reproduzir valores adequados de temperatura e humidade em tempo real num determinado espaço, requerendo a programação do código no software Arduino IDE, identificado na Figura 23.

```

#include "DHT.h"
#define DHT11PIN 33

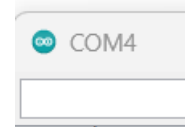
DHT dht(DHT11PIN, DHT11);
void setup()
{
  Serial.begin(115200);
  dht.begin();
}

void loop () {

  float H = dht.readHumidity();
  float T = dht.readTemperature();
  String Data = String(T) + "," + String(H);
  Serial.println(Data);
  delay(1000);
}

```

c)



d)

```

21.80,55.00
21.80,55.00
21.80,57.00
21.80,57.00
22.20,58.00
22.20,58.00
22.20,59.00
22.20,59.00
22.20,60.00
22.20,60.00
22.60,60.00
22.60,60.00
22.60,60.00
22.60,60.00
22.60,60.00

```

Figura 23 – c) Código adaptado para integração no Node-Red; d) Output

Após enviar o código para o Arduino ESP32, foi adaptada a arquitetura descrita na Figura 15, de modo a implementar o novo sensor aplicado, dando origem ao fluxo esquematizado na Figura 24.

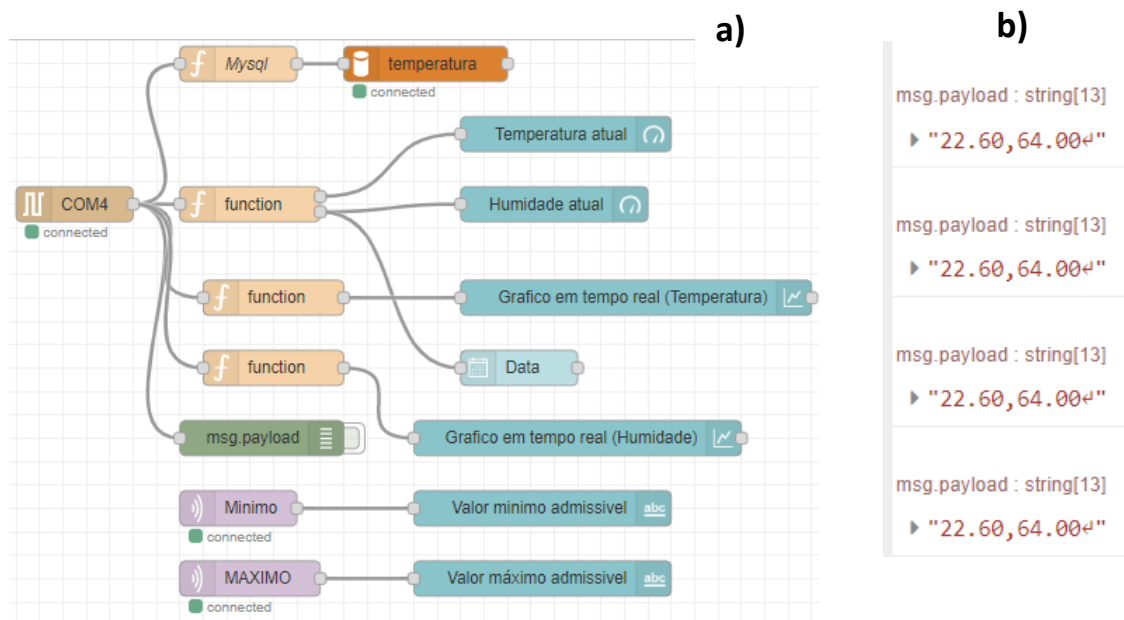


Figura 24 – a) Fluxo desenvolvido no Node-red; b) Output/Valores recebidos pelo sensor DHT11

No fluxo mencionado anteriormente foi necessário desenvolver as funções esquematizadas na Figura 25, que permitem a construção dos gráficos de monitorização de temperatura e humidade.



The figure displays three screenshots of a code editor interface, likely Node-RED, showing JavaScript code for processing messages. Each screenshot has a header with four tabs: 'Setup', 'On Start', 'On Message', and 'On Stop'. The 'On Message' tab is selected in all three.

```
1 m = msg.payload.split(',');
2 humi = {payload:parseFloat(m[1])};
3 temp = {payload:parseFloat(m[0])};
4
5 return [temp,humi];
```

```
1 m = msg.payload.split(',');
2 temp = {payload:parseFloat(m[0])};
3
4 return [temp];
```

```
1 m = msg.payload.split(',');
2 temp = {payload:parseFloat(m[1])};
3
4 return [humi];
```

Figura 25 - Funções utilizadas na construção dos gráficos.

O resultado está esquematizado na Figura 26, onde se pode observar o dashboard de monitorização de um ambiente real.

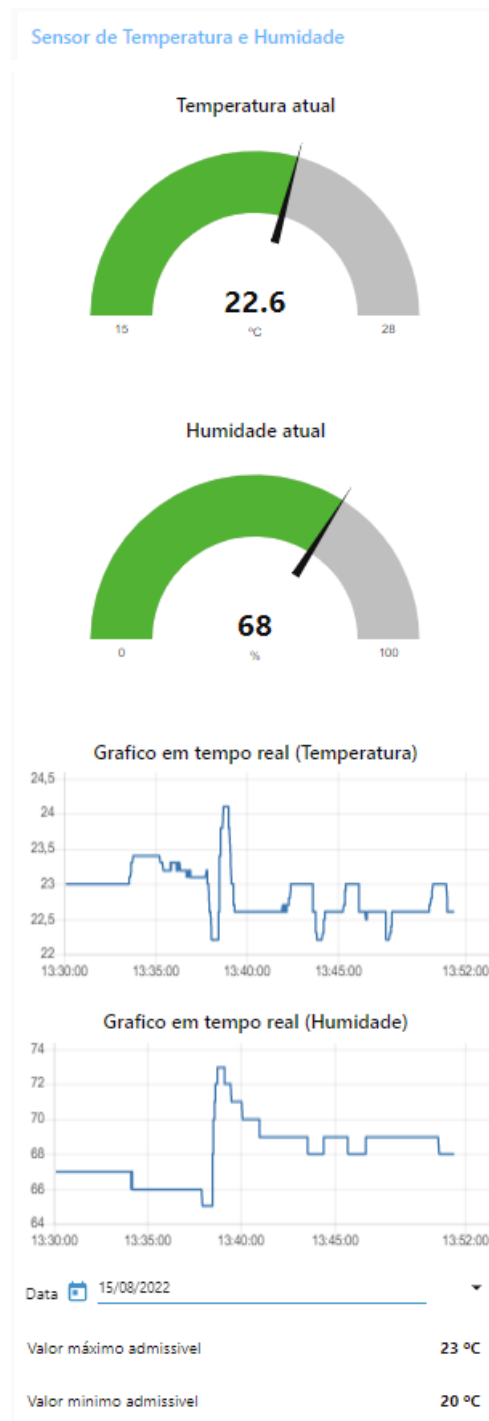


Figura 26 - Resultado obtidos pelo sensor

A arquitetura desenvolvida permite generalizar a aplicação deste conceito, isto é, monitorização e aquisição de dados em tempo real, contudo para cada situação deve ser analisada a aplicabilidade desta solução, pois não é a única existente no mercado.

3.2.2. Plataforma virtual

O setor produtivo está presente num ambiente cada vez mais complexo, dinâmico e competitivo pelo que é necessário encontrar soluções que respondam a diversas mudanças no mercado, sejam tecnológicas ou geográficas. Estes fatores aumentaram a complexidade do planeamento do controlo produtivo, pelo que é necessário recorrer a tecnologias emergentes na indústria 4.0, para encontrar soluções mais eficazes que respondam a estes desafios.

Uma das soluções, que pode responder a estes desafios impostos nos dias de hoje, é a criação de sistemas totalmente conectados, cujo foco seja a descentralização da produção pela conectividade dos seus intervenientes. A rede de recursos construída permite colmatar problemas associados às avarias dos equipamentos, ao limite da capacidade produtiva, dificuldades relativas ao desenvolvimento de rotas que favoreçam a redução dos custos logísticos.

A proposta de uma fábrica digital pressupõe combinação de recursos, equipamentos e pessoas de forma a construir unidades de produção virtuais distribuídas do posto de vista geográfica, desenvolvendo todas as operações associadas à planificação desde a seleção da matéria-prima até à definição de toda a cadeia logística de fornecimento ao cliente. A digitalização de vários recursos nesta plataforma, permite a criação automática de múltiplas rotas de produção compensando as falhas por avarias de equipamentos, emergindo uma alternativa que responde aos prazos exigidos pelos clientes.

O conceito associado à plataforma consiste numa solução flexível, otimizada e descentralizada, para além de que toda esta transparência patente nesta solução permite que o gestor tome a melhores decisões para ir de encontro à necessidade dos seus clientes. A solução passa pela criação de formulários para caracterização do produto, afetação dos recursos e desenvolvimento da linha produtiva com recursos 3D e monitorização dos mesmos através de dashboards.

3.2.2.1. Definição do produto

A digitalização do produto começa pelo preenchimento de um formulário, exemplificado na Figura 27, referente à definição do produto nomeadamente a designação, área de negócio, características do produto (dimensão, peso), volume de produção (ordem única ou mensal), modelo 3D (ficheiro CAD), árvore do produto (BOM) e respetivos desenhos. Esta etapa permite obter a definição do produto e conseqüentemente desenvolver o sistema produtivo adequado, armazenando esta informação numa base de dados para posterior análise.

Produto

Designação:

Área de negócio

Dimensão do produto (C x L x H):

Peso do produto (Kg):

Cliente:

Data de entrega:

Preço de venda:

Volume de produção:

Modelo 3D do Produto:
 Não foi escolhido nenhum ficheiro

BOM (Bim of Materials):
 Não foi escolhido nenhum ficheiro

Figura 27 – Formulário para definição do produto

As etapas posteriores dizem respeito á definição dos componentes que o compõe, em formulários, esquematizado na Figura 28**Erro! A origem da referência não foi encontrada.**, permitindo a sua caracterização individual, de forma a seleccionar os recursos de subcontratação ideais.

Componentes

Componente 1	Adicionar componente
--------------	----------------------

Designação:

Dimensão do componente:

Peso do componente:

Designação do material:

Dimensão do material em bruto:

Volume de produção:

Ordem única:

Ordem mensal:

Modelo 3D do componente (PDF):

 Não foi escolhido nenhum ficheiro

Modelo 3D do componente (edrawings):

 Não foi escolhido nenhum ficheiro

Desenho 2D do componente (PDF):

 Não foi escolhido nenhum ficheiro

Figura 28 - Formulário para definição dos componentes

O último passo consiste no planeamento do processo através da definição das operações de fabrico e dos equipamentos necessários ao fabrico de cada componente. A informação é armazenada numa tabela em base de dados para possibilitar a predefinição dos recursos capazes de cumprir os requisitos, garantindo a conformidade do produto. Este planeamento é suportado por um modelo 3D do componente, em que a título ilustrativo se selecionou um martelo, exemplificado na Figura 29. Nota que a informação apresentada advém da aplicação de um filtro à base de dados existente, mostrando apenas os recursos capazes de cumprir as características exigidas.

Planeamento do processo

Operação n°:

Numero da operação:

Nome da operação:

Nome da operação:

Equipamento:

Nome do equipamento:

Ferramenta:

Nome da ferramenta:



ID	Operação n°	Nome da operação	Planeamento do processo Equipamento	Ferramenta	Ações
----	-------------	------------------	--	------------	-------

Figura 29 - Formulário para definição das etapas de fabrico

3.2.3. Desenvolvimento da Fábrica Digital

A construção, do modelo da uma fábrica digital, começa pela idealização da linha produtiva ideal ao desenvolvimento do produto/componente pretendido, em que a seleção prévia dos recursos necessários á definição da sequência produtiva é realizada com base nos formulários preenchidos anteriormente.

O gestor desenvolve em ambiente virtual um modelo da sua fábrica digital, capaz de ter uma perspetiva ampla da linha de produção desenvolvida, tendo em vista a otimização do processo. A construção desta começa pela idealização da linha produtiva ideal ao desenvolvimento do produto pretendido, em que a seleção prévia dos recursos necessários á definição da sequência produtiva é realizada com base nas operações de fabrico, necessárias á construção do componente/produto. A idealização desta linha produtiva é realizada num ambiente 3D, que irá representar a fabrica digital que estará completa após a escolha dos recursos disponíveis no mercado.

O exemplo, esquematizado na Figura 30, diz respeito a uma demonstração de uma linha produtiva composta por uma máquina CNC e um forno de tempera, estando associados dois carrinhos que representam a quantidade de peças produzidas e uma transportadora, que representa o transporte da peça entre recursos, distribuídos do ponto de vista geográfico.

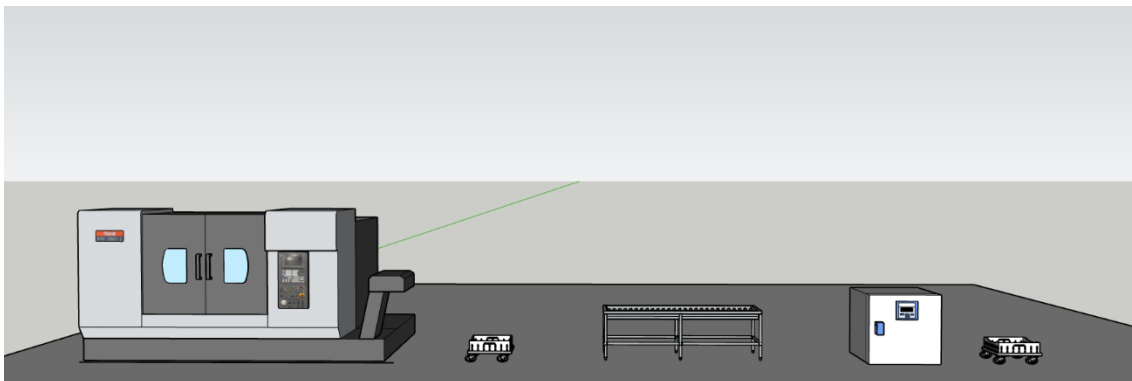


Figura 30 – Exemplo de uma linha produtiva

3.2.3.1. Seleção dos recursos integrantes

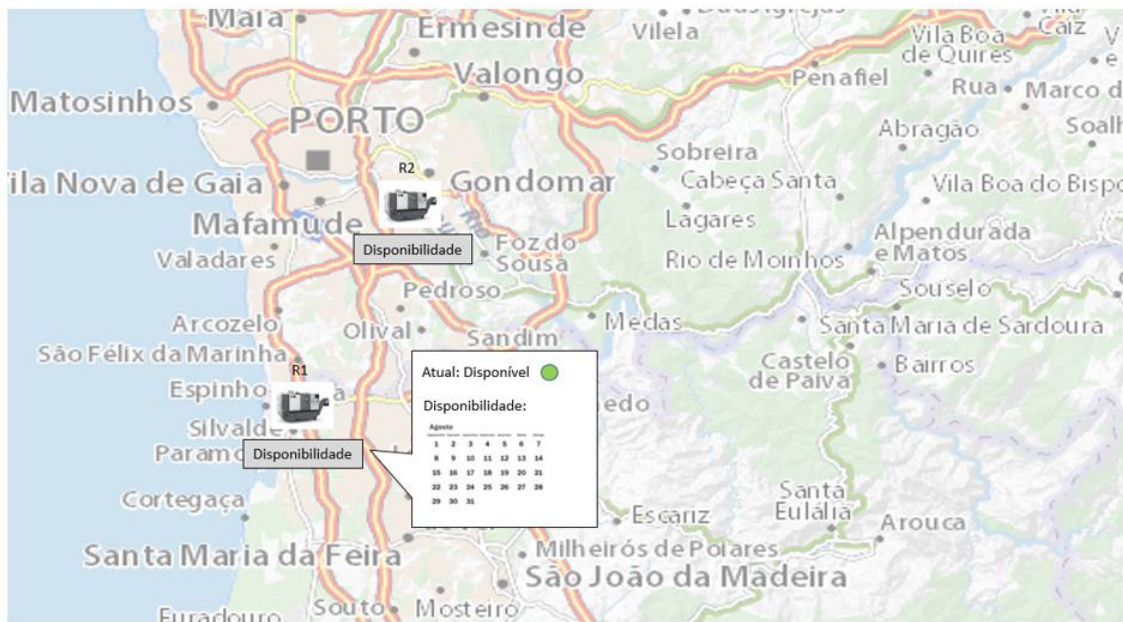
Na fábrica digital, após a construção virtual da linha produtiva, são definidos os recursos integrantes do processo, sendo apresentadas as várias opções disponíveis no mercado. Os recursos apresentados capazes de produzir o componente, são definidos pelas suas especificações como a marca, características técnicas, capacidade produtiva e índice de qualidade, facilitando a escolha do equipamento que mais se adequa às especificações pretendidas pelo cliente. A solução apresentada, descreve a título exemplificativo, algumas soluções para o primeiro equipamento da linha, sendo o método de escolha transversal a todos os outros recursos integrantes.

Na Figura 31 está exemplificado a interface em que o gestor pode selecionar quais os recursos adequados e visualizar a sua ficha técnica, sendo que para cada etapa de produção pode selecionar mais que um recurso, de forma a escolher a melhor solução.



Figura 31 - Recursos disponíveis e adequados

Cada recurso escolhido para integrar a fábrica digital é mapeado, como representado na Figura 32, permitindo a visualização da localização geográfica de cada um, como também a respetiva disponibilidade. Como ferramenta de apoio á decisão é criada uma tabela, onde os diferentes critérios de seleção são apresentados, desde localização, área de negócio, disponibilidade, prazo de entrega e ratio, sendo que esta informação pode ser ordenada por grau de melhor adequabilidade à necessidade, auxiliando a escolha do recurso que melhor se adequa às necessidades do cliente. Este processo de seleção dos recursos é repetido para toda a linha produtiva já definida anteriormente.



Características dos recursos						
ID	Recurso	Nome	Área de negócio	Localização geográfica (Cidade/País)	Prazo de entrega	Ratio
1	R1	Haas/CNC ST-10Y	Diversas áreas	Espinho/Portugal	5 dias	4.6
2	R2	Haas/CNC ST-10Y	Ramo automóvel	Gondomar/Portugal	10 dias	4.7

Figura 32 - Distribuição geográfica dos recursos selecionados disponíveis

Concluída a definição dos recursos, esta arquitetura propõe o uso de contratos inteligentes como forma de concluir o negócio com os fornecedores dos recursos. Após a conclusão do contrato, a encomenda tem de ser registada de forma a permitir o acompanhamento em tempo real de todo o processo produtivo. Completando a definição dos recursos integrantes do ciclo produtivo, é apresentado um resumo da linha produtiva, esquematizado na Figura 33, de cada componente através de áreas circundantes que incluem as diferentes localizações dos serviços subcontratados.

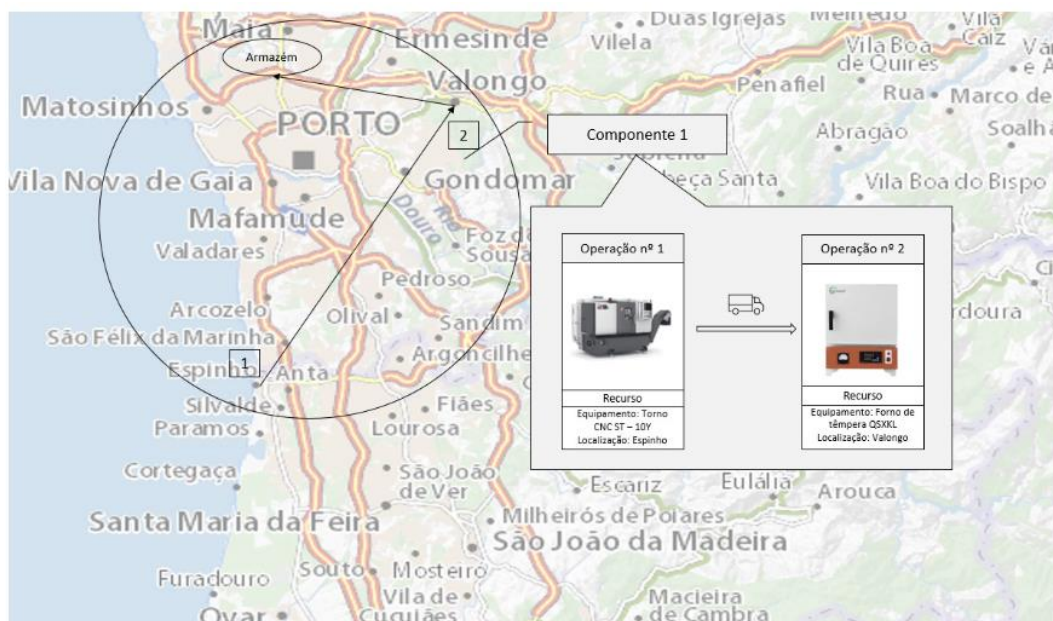


Figura 33 - Exemplo do sequenciamento das operações subcontratadas

3.2.4. Virtualização e monitorização da linha produtiva

O funcionamento pleno desta proposta de conceito é garantido pela agregação de todas estas etapas num modelo dinâmico, esquematizado na Figura 34, que permita a fluidez da linha produtiva, bem como a implementação de alguma transparência durante o processo produtivo de forma a permitir o controlo do sistema e ainda o desenvolvimento de uma base de dados coletiva que procure agregar a informação proveniente de diferentes tipos de recursos. O ambiente virtual desenvolvido evidencia também o potencial presente das ferramentas opensource, sobretudo a facilidade com que o utilizador consegue utilizar para a partilha de informação.

A monitorização do estado dos recursos é conseguida através da instalação de sensores, que transmitem a informação dos parâmetros relevantes ao seu bom funcionamento para um dashboard de controlo, desenvolvido através de uma ferramenta opensource denominada de Node-red. O protocolo de comunicação desenvolvido garante a comunicação dos sensores com esta, bem como com uma base de dados, que armazena os dados para posterior análise e tratamento. Para isto, é necessário partilhar na plataforma o número interno da ordem de produção da empresa, de forma que quando as máquinas estiverem a produzir essa ordem possam transmitir através dos seus mecanismos sensorizados. Em paralelo, deverá ser selecionada a empresa que irá tratar da logística entre recursos, sendo que o algoritmo facilitará a melhor escolha, tendo por base a localização geográfica da empresa de logística e das respetivas empresas de produção, de forma a reduzir os custos associados.

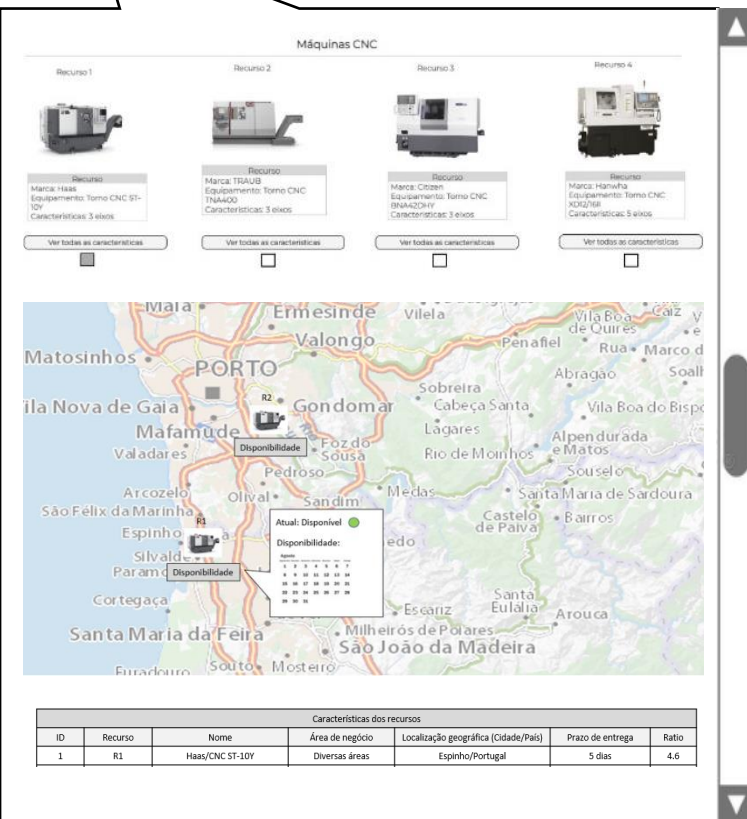
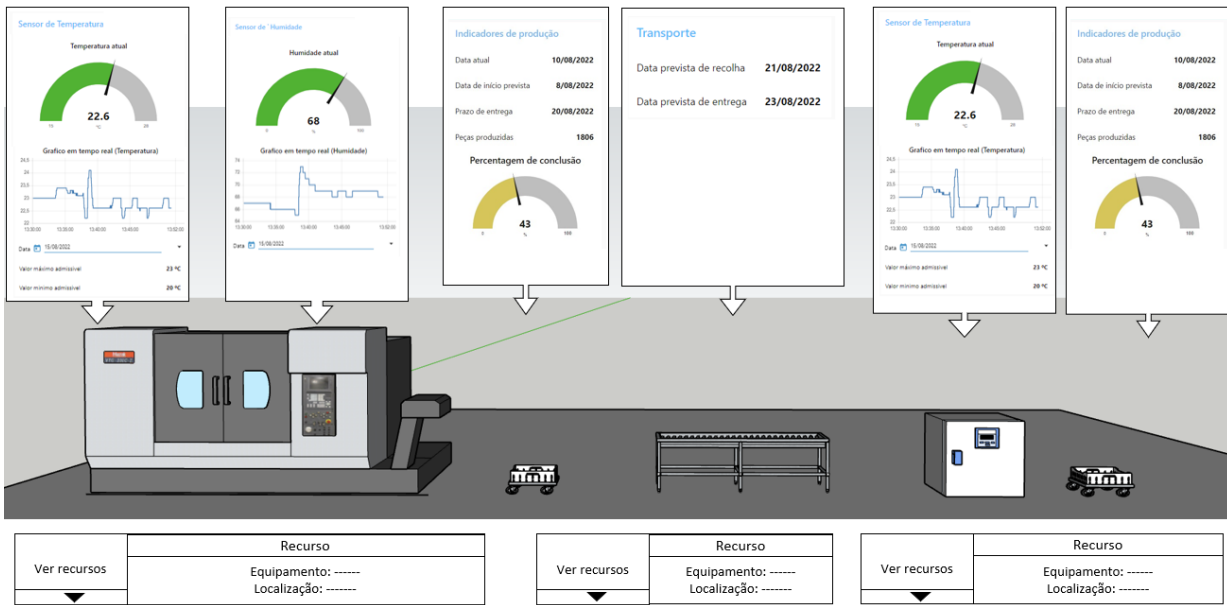


Figura 34 - Proposta para uma nova solução de uma fábrica virtual

4. CONCLUSÃO

À medida que concluímos esta análise, torna-se evidente que a convergência entre a tecnologia e a produção alterou a paisagem industrial. A exploração conjunta dos conceitos de personalização do produto, a descentralização da produção e o *digital twin* ilustra como as empresas agora podem navegar num ambiente de negócios cada vez mais complexo e dinâmico. A personalização permitiu dar ênfase às preferências individuais dos clientes, enquanto a descentralização trouxe agilidade e adaptação a mercados locais. Paralelamente, o *digital twin* trouxe uma dimensão virtual que permite simulações precisas e melhorias contínuas. Ao considerar o cenário completo, torna-se claro que o futuro da produção será moldado pela interação destes conceitos, permitindo que as empresas respondam à procura de uma forma ágil, eficiente e inovadora.

4.1. Conclusões finais

A Indústria 4.0 está a revolucionar o paradigma da produção industrial, impulsionada pela digitalização da informação e amplificada pela melhoria da capacidade computacional e da automação. Nesse contexto, os CPS desempenham um papel crucial no cenário produtivo atual, tendo como objetivo central, a integração dos dados recolhidos por sensores distribuídos em todo o chão de fábrica numa rede capaz de processar e definir ações estratégicas através da inteligência artificial.

Perante o cenário atual, com a crescente procura por produtos personalizados, a necessidade de desenvolver abordagens flexíveis e versáteis torna-se cada vez mais imperativa. A Indústria 4.0 e as tecnologias associadas, como o Digital Twin, desempenham um papel crucial ao permitir que as empresas se adaptem com eficiência á procura volátil. Nesse contexto, a capacidade de simular cenários e avaliar estratégias de produção é essencial para oferecer produtos personalizados de maneira ágil e eficaz.

A produção descentralizada, conforme descrita anteriormente, emerge como uma estratégia dinâmica para enfrentar as inevitáveis interrupções no processo produtivo. Baseia-se na utilização de recursos disponíveis em outras unidades produtivas, seja para superar a falta de máquinas, matéria-prima, mão de obra ou para subcontratar serviços a empresas mais especializadas. Essa abordagem, embora levante preocupações de segurança, paradoxalmente, fortalece a transparência entre os diversos stakeholders envolvidos.

Neste contexto, o desenvolvimento da plataforma virtual mencionada nesta dissertação assume um papel de destaque. Esta plataforma promove uma produção descentralizada que se apoia na colaboração e compartilhamento de recursos. Nesta ferramenta, é possível definir toda a linha produtiva de um produto, criando um canal de comunicação eficiente para gestores, clientes e fornecedores, abrangendo todas as etapas, desde a conceção do produto, passando pelos processos de fabrico, seleção de recursos, otimização da logística e monitorização da linha produtiva.

O Internet of Things (IoT) desempenha um papel crucial, permitindo o acompanhamento em tempo real do estado da produção, graças à sensorização dos recursos. Além disso, ferramentas como o Node-RED possibilitam a criação de dashboards personalizáveis, fornecendo informações valiosas

sobre o estado das encomendas. É importante referir que o Arduino demonstrou ser uma escolha eficaz e econômica para a aquisição de dados, contribuindo para a eficiência e confiabilidade do sistema.

Assim, essa dissertação apresenta uma abordagem abrangente e inovadora para a produção descentralizada, alavancando a tecnologia IoT e soluções como o Arduino para tornar a cadeia de produção mais ágil, colaborativa e transparente, atendendo às necessidades dinâmicas dos clientes.

A produção descentralizada, como previamente discutido, apresenta uma série de benefícios que otimizam significativamente o processo produtivo. Isso inclui o aumento da capacidade produtiva por meio da subcontratação, a diminuição dos prazos de entrega, a diversificação dos processos de fabrico para expandir o mercado de atuação e o aumento dos padrões de qualidade. No entanto, o sucesso da produção descentralizada depende, em grande parte, da implementação de contratos inteligentes entre as partes envolvidas. Esses contratos promovem a transparência e a responsabilidade em todos os estágios do processo de produção. O que é notável é que esses contratos são efetuados de forma rápida, simples e intuitiva, simplificando a complexidade inerente à produção descentralizada.

A plataforma virtual, como discutido anteriormente, foi projetada para ser user-friendly, proporcionando uma experiência fluida e eficaz para diversos utilizadores. Ela integra os diversos aspetos delineados ao longo da dissertação, culminando na criação de uma plataforma multifacetada que serve como um canal de comunicação central para gestores, clientes e fornecedores. Esta abordagem colaborativa e tecnologicamente avançada é fundamental para enfrentar os desafios de um mercado em constante evolução e para atender à crescente procura por personalização e eficiência na produção.

Em síntese, a convergência da Indústria 4.0 com a personalização do produto, descentralização da produção e a aplicação de *digital twin* está a mudar a perspetiva da indústria. Estas abordagens interligadas capacitam as empresas a se adaptarem rapidamente às necessidades variáveis dos clientes e à dinâmica competitiva do mercado global. A adoção das tecnologias já mencionadas permite promover uma maior transparência, permitindo criar uma base sólida para uma produção mais eficiente, com produtos de qualidade superior e uma maior expansão no mercado. Este cenário representa um futuro em que a indústria se torna ágil, colaborativa e pronta para prosperar em um ambiente empresarial em constante mutação.

4.2. Limitações e trabalhos futuros

O primeiro passo após esta dissertação seria criar parcerias com algumas empresas de forma a testar o conceito desta plataforma virtual num ambiente real embora a uma escala reduzida. Deste teste resultaria diversas melhorias á plataforma e otimização do conceito de produção descentralizada.

A plataforma desenvolvida tem potencial para ser diversificada noutras áreas de atuação com a área dos serviços e saúde, contudo seria alvo de redefinição.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Y. Lu, X. Xu, and L. Wang, "Smart manufacturing process and system automation – A critical review of the standards and envisioned scenarios," *J. Manuf. Syst.*, vol. 56, pp. 312–325, Jul. 2020, doi: 10.1016/J.JMSY.2020.06.010.
- [2] A. Napoleone, M. Macchi, and A. Pozzetti, "A review on the characteristics of cyber-physical systems for the future smart factories," *J. Manuf. Syst.*, vol. 54, pp. 305–335, Jan. 2020, doi: 10.1016/J.JMSY.2020.01.007.
- [3] R. Rosen, G. Von Wichert, G. Lo, and K. D. Bettenhausen, "About The Importance of Autonomy and Digital Twins for the Future of Manufacturing," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 48, no. 3, pp. 567–572, Jan. 2015, doi: 10.1016/J.IFACOL.2015.06.141.
- [4] J. de A. Dornelles, N. F. Ayala, and A. G. Frank, "Smart Working in Industry 4.0: How digital technologies enhance manufacturing workers' activities," *Comput. Ind. Eng.*, vol. 163, p. 107804, Jan. 2022, doi: 10.1016/J.CIE.2021.107804.
- [5] M. Beltrami, G. Orzes, J. Sarkis, and M. Sartor, "Industry 4.0 and sustainability: Towards conceptualization and theory," *J. Clean. Prod.*, vol. 312, p. 127733, Aug. 2021, doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2021.127733.
- [6] D. K. Srivastava, V. Kumar, B. Y. Ekren, A. Upadhyay, M. Tyagi, and A. Kumari, "Adopting Industry 4.0 by leveraging organisational factors," *Technol. Forecast. Soc. Change*, vol. 176, p. 121439, Mar. 2022, doi: 10.1016/J.TECHFORE.2021.121439.
- [7] X. Xu, Y. Lu, B. Vogel-Heuser, and L. Wang, "Industry 4.0 and Industry 5.0—Inception, conception and perception," *J. Manuf. Syst.*, vol. 61, pp. 530–535, Oct. 2021, doi: 10.1016/J.JMSY.2021.10.006.
- [8] D. G. S. Pivoto, L. F. F. de Almeida, R. da Rosa Righi, J. J. P. C. Rodrigues, A. B. Lugli, and A. M. Alberti, "Cyber-physical systems architectures for industrial internet of things applications in Industry 4.0: A literature review," *J. Manuf. Syst.*, vol. 58, pp. 176–192, Jan. 2021, doi: 10.1016/J.JMSY.2020.11.017.
- [9] L. Wang, M. Törngren, and M. Onori, "Current status and advancement of cyber-physical systems in manufacturing," *J. Manuf. Syst.*, vol. 37, pp. 517–527, Oct. 2015, doi: 10.1016/J.JMSY.2015.04.008.
- [10] M. A. Pisching, M. A. O. Pessoa, F. Junqueira, D. J. dos Santos Filho, and P. E. Miyagi, "An architecture based on RAMI 4.0 to discover equipment to process operations required by products," *Comput. Ind. Eng.*, vol. 125, pp. 574–591, Nov. 2018, doi: 10.1016/J.CIE.2017.12.029.
- [11] T. Lins and R. A. R. Oliveira, "Cyber-physical production systems retrofitting in context of industry 4.0," *Comput. Ind. Eng.*, vol. 139, p. 106193, Jan. 2020, doi: 10.1016/J.CIE.2019.106193.
- [12] A. Sisodia and R. Jindal, "A meta-analysis of industry 4.0 design principles applied in the health sector," *Eng. Appl. Artif. Intell.*, vol. 104, p. 104377, Sep. 2021, doi: 10.1016/J.ENGAPPAI.2021.104377.
- [13] R. Y. Zhong, X. Xu, E. Klotz, and S. T. Newman, "Intelligent Manufacturing in the Context of Industry 4.0: A Review," *Engineering*, vol. 3, no. 5, pp. 616–630, Oct. 2017, doi: 10.1016/J.ENG.2017.05.015.
- [14] M. Ghobakhloo and M. Fathi, "Industry 4.0 and opportunities for energy sustainability," *J.*

- Clean. Prod.*, vol. 295, p. 126427, May 2021, doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2021.126427.
- [15] P. Toktaş-Palut, "Analyzing the effects of Industry 4.0 technologies and coordination on the sustainability of supply chains," *Sustain. Prod. Consum.*, vol. 30, pp. 341–358, Mar. 2022, doi: 10.1016/J.SPC.2021.12.005.
- [16] M. Perno, L. Hvam, and A. Haug, "Implementation of digital twins in the process industry: A systematic literature review of enablers and barriers," *Comput. Ind.*, vol. 134, p. 103558, Jan. 2022, doi: 10.1016/J.COMPIND.2021.103558.
- [17] C. Cimino, E. Negri, and L. Fumagalli, "Review of digital twin applications in manufacturing," *Comput. Ind.*, vol. 113, p. 103130, Dec. 2019, doi: 10.1016/J.COMPIND.2019.103130.
- [18] H. Feng, D. Chen, and H. Lv, "Sensible and secure IoT communication for digital twins, cyber twins, web twins," *Internet Things Cyber-Physical Syst.*, Dec. 2021, doi: 10.1016/J.IOTCPS.2021.12.003.
- [19] I. Lee and K. Lee, "The Internet of Things (IoT): Applications, investments, and challenges for enterprises," *Bus. Horiz.*, vol. 58, no. 4, pp. 431–440, Jul. 2015, doi: 10.1016/J.BUSHOR.2015.03.008.
- [20] M. Díaz, C. Martín, and B. Rubio, "State-of-the-art, challenges, and open issues in the integration of Internet of things and cloud computing," *J. Netw. Comput. Appl.*, vol. 67, pp. 99–117, May 2016, doi: 10.1016/J.JNCA.2016.01.010.
- [21] H. Elazhary, "Internet of Things (IoT), mobile cloud, cloudlet, mobile IoT, IoT cloud, fog, mobile edge, and edge emerging computing paradigms: Disambiguation and research directions," *J. Netw. Comput. Appl.*, vol. 128, pp. 105–140, Feb. 2019, doi: 10.1016/J.JNCA.2018.10.021.
- [22] J. Zhang, M. Ma, P. Wang, and X. dong Sun, "Middleware for the Internet of Things: A survey on requirements, enabling technologies, and solutions," *J. Syst. Archit.*, vol. 117, p. 102098, Aug. 2021, doi: 10.1016/J.SYSARC.2021.102098.
- [23] A. E. Omolara *et al.*, "The internet of things security: A survey encompassing unexplored areas and new insights," *Comput. Secur.*, vol. 112, p. 102494, Jan. 2022, doi: 10.1016/J.COSE.2021.102494.
- [24] S. K. Mishra and A. Sarkar, "Service-oriented architecture for Internet of Things: A semantic approach," *J. King Saud Univ. - Comput. Inf. Sci.*, Oct. 2021, doi: 10.1016/J.JKSUCI.2021.09.024.
- [25] T. Yang, X. Yi, S. Lu, K. H. Johansson, and T. Chai, "Intelligent Manufacturing for the Process Industry Driven by Industrial Artificial Intelligence," *Engineering*, vol. 7, no. 9, pp. 1224–1230, Sep. 2021, doi: 10.1016/J.ENG.2021.04.023.
- [26] M. Suvarna, K. S. Yap, W. Yang, J. Li, Y. T. Ng, and X. Wang, "Cyber–Physical Production Systems for Data-Driven, Decentralized, and Secure Manufacturing—A Perspective," *Engineering*, vol. 7, no. 9, pp. 1212–1223, Sep. 2021, doi: 10.1016/J.ENG.2021.04.021.
- [27] M. Pournader, H. Ghaderi, A. Hassanzadegan, and B. Fahimnia, "Artificial intelligence applications in supply chain management," *Int. J. Prod. Econ.*, vol. 241, p. 108250, Nov. 2021, doi: 10.1016/J.IJPE.2021.108250.
- [28] A. Darko, A. P. C. Chan, M. A. Adabre, D. J. Edwards, M. R. Hosseini, and E. E. Ameyaw, "Artificial intelligence in the AEC industry: Scientometric analysis and visualization of research activities," *Autom. Constr.*, vol. 112, p. 103081, Apr. 2020, doi: 10.1016/J.AUTCON.2020.103081.

- [29] M. Subramaniyan, A. Skoogh, J. Bokrantz, M. A. Sheikh, M. Thüerer, and Q. Chang, "Artificial intelligence for throughput bottleneck analysis – State-of-the-art and future directions," *J. Manuf. Syst.*, vol. 60, pp. 734–751, Jul. 2021, doi: 10.1016/J.JMSY.2021.07.021.
- [30] N. J. Gati, L. T. Yang, J. Feng, X. Nie, Z. Ren, and S. K. Tarus, "Differentially private data fusion and deep learning Framework for Cyber–Physical–Social Systems: State-of-the-art and perspectives," *Inf. Fusion*, vol. 76, pp. 298–314, Dec. 2021, doi: 10.1016/J.INFFUS.2021.04.017.
- [31] Q. Qi *et al.*, "Enabling technologies and tools for digital twin," *J. Manuf. Syst.*, vol. 58, pp. 3–21, Jan. 2021, doi: 10.1016/j.jmsy.2019.10.001.
- [32] J. Xiong and J. Wu, "Construction of approximate reasoning model for dynamic CPS network and system parameter identification," *Comput. Commun.*, vol. 154, pp. 180–187, Mar. 2020, doi: 10.1016/J.COMCOM.2020.02.073.
- [33] S. Wang, J. Wan, D. Zhang, D. Li, and C. Zhang, "Towards smart factory for industry 4.0: a self-organized multi-agent system with big data based feedback and coordination," *Comput. Networks*, vol. 101, pp. 158–168, Jun. 2016, doi: 10.1016/J.COMNET.2015.12.017.
- [34] K. Hribernik, G. Cabri, F. Mandreoli, and G. Mentzas, "Autonomous, context-aware, adaptive Digital Twins—State of the art and roadmap," *Comput. Ind.*, vol. 133, p. 103508, Dec. 2021, doi: 10.1016/J.COMPIND.2021.103508.
- [35] E. Bou-Harb, N. Ghani, A. Erradi, and K. Shaban, "Passive inference of attacks on CPS communication protocols," *J. Inf. Secur. Appl.*, vol. 43, pp. 110–122, Dec. 2018, doi: 10.1016/J.JISA.2018.10.002.
- [36] H. Cañas, J. Mula, M. Díaz-Madroñero, and F. Campuzano-Bolarín, "Implementing Industry 4.0 principles," *Comput. Ind. Eng.*, vol. 158, p. 107379, Aug. 2021, doi: 10.1016/J.CIE.2021.107379.
- [37] E. Y. Nakagawa, P. O. Antonino, F. Schnicke, R. Capilla, T. Kuhn, and P. Liggesmeyer, "Industry 4.0 reference architectures: State of the art and future trends," *Comput. Ind. Eng.*, vol. 156, p. 107241, Jun. 2021, doi: 10.1016/J.CIE.2021.107241.
- [38] M. Yli-Ojanperä, S. Sierla, N. Papakonstantinou, and V. Vyatkin, "Adapting an agile manufacturing concept to the reference architecture model industry 4.0: A survey and case study," *J. Ind. Inf. Integr.*, vol. 15, pp. 147–160, Sep. 2019, doi: 10.1016/J.JII.2018.12.002.
- [39] J. Lee, B. Bagheri, and H. A. Kao, "A Cyber-Physical Systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems," *Manuf. Lett.*, vol. 3, pp. 18–23, Jan. 2015, doi: 10.1016/J.MFGLET.2014.12.001.
- [40] R. Sahba, R. Radfar, A. Rajabzadeh Ghatari, and A. Pour Ebrahimi, "Development of Industry 4.0 predictive maintenance architecture for broadcasting chain," *Adv. Eng. Informatics*, vol. 49, p. 101324, Aug. 2021, doi: 10.1016/J.AEI.2021.101324.
- [41] J. B. H. C. Didden, Q. V. Dang, and I. J. B. F. Adan, "A semi-decentralized control architecture for high-mix-low-volume factories in Industry 4.0," *Manuf. Lett.*, vol. 30, pp. 11–14, Oct. 2021, doi: 10.1016/J.MFGLET.2021.09.005.
- [42] B. Wang, P. Wang, and Y. Tu, "Customer satisfaction service match and service quality-based blockchain cloud manufacturing," *Int. J. Prod. Econ.*, vol. 240, p. 108220, Oct. 2021, doi: 10.1016/J.IJPE.2021.108220.
- [43] C. Semeraro, M. Lezoche, H. Panetto, and M. Dassisti, "Digital twin paradigm: A systematic literature review," *Comput. Ind.*, vol. 130, p. 103469, Sep. 2021, doi:

- 10.1016/J.COMPIND.2021.103469.
- [44] F. Tao, Q. Qi, L. Wang, and A. Y. C. Nee, "Digital Twins and Cyber–Physical Systems toward Smart Manufacturing and Industry 4.0: Correlation and Comparison," *Engineering*, vol. 5, no. 4, pp. 653–661, Aug. 2019, doi: 10.1016/J.ENG.2019.01.014.
- [45] E. H. Glaessgen and D. S. Stargel, "The digital twin paradigm for future NASA and U.S. Air force vehicles," *Collect. Tech. Pap. - AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Struct. Struct. Dyn. Mater. Conf.*, 2012, doi: 10.2514/6.2012-1818.
- [46] M. Grieves, "Digital twin: manufacturing excellence through virtual factory replication," *white Pap.*, vol. 1, pp. 1–7, 2014.
- [47] J. Leng, H. Zhang, D. Yan, Q. Liu, X. Chen, and D. Zhang, "Digital twin-driven manufacturing cyber-physical system for parallel controlling of smart workshop," *J. Ambient Intell. Humaniz. Comput.*, vol. 10, no. 3, 2019, doi: 10.1007/s12652-018-0881-5.
- [48] T. G. Ritto and F. A. Rochinha, "Digital twin, physics-based model, and machine learning applied to damage detection in structures," *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 155, p. 107614, Jun. 2021, doi: 10.1016/J.YMSSP.2021.107614.
- [49] L. Yujun, Z. Zhichang, W. Wei, and Z. Kui, "Digital twin product lifecycle system dedicated to the constant velocity joint," *Comput. Electr. Eng.*, vol. 93, p. 107264, Jul. 2021, doi: 10.1016/J.COMPELECENG.2021.107264.
- [50] E. VanDerHorn and S. Mahadevan, "Digital Twin: Generalization, characterization and implementation," *Decis. Support Syst.*, vol. 145, p. 113524, Jun. 2021, doi: 10.1016/J.DSS.2021.113524.
- [51] I. Errandonea, S. Beltrán, and S. Arrizabalaga, "Digital Twin for maintenance: A literature review," *Comput. Ind.*, vol. 123, p. 103316, Dec. 2020, doi: 10.1016/J.COMPIND.2020.103316.
- [52] M. Perno, L. Hvam, and A. Haug, "Implementation of digital twins in the process industry: A systematic literature review of enablers and barriers," *Comput. Ind.*, vol. 134, p. 103558, Jan. 2022, doi: 10.1016/J.COMPIND.2021.103558.
- [53] S. Zeb, A. Mahmood, S. A. Hassan, M. J. Piran, M. Gidlund, and M. Guizani, "Industrial digital twins at the nexus of NextG wireless networks and computational intelligence: A survey," *J. Netw. Comput. Appl.*, vol. 200, p. 103309, Apr. 2022, doi: 10.1016/J.JNCA.2021.103309.
- [54] F. Tao, Q. Qi, L. Wang, and A. Y. C. Nee, "Digital Twins and Cyber–Physical Systems toward Smart Manufacturing and Industry 4.0: Correlation and Comparison," *Engineering*, vol. 5, no. 4, pp. 653–661, Aug. 2019, doi: 10.1016/j.eng.2019.01.014.
- [55] J. O’Sullivan, D. O’Sullivan, and K. Bruton, "A case-study in the introduction of a digital twin in a large-scale smart manufacturing facility," *Procedia Manuf.*, vol. 51, pp. 1523–1530, Jan. 2020, doi: 10.1016/J.PROMFG.2020.10.212.
- [56] J. Feldt, T. Kourouklis, H. Kontny, and A. Wagenitz, "Digital twin: revealing potentials of real-time autonomous decisions at a manufacturing company," *Procedia CIRP*, vol. 88, pp. 185–190, Jan. 2020, doi: 10.1016/J.PROCIR.2020.05.033.
- [57] A. A. Malik and A. Brem, "Digital twins for collaborative robots: A case study in human-robot interaction," *Robot. Comput. Integr. Manuf.*, vol. 68, p. 102092, Apr. 2021, doi: 10.1016/J.RCIM.2020.102092.
- [58] Y. Yi, Y. Yan, X. Liu, Z. Ni, J. Feng, and J. Liu, "Digital twin-based smart assembly process design and application framework for complex products and its case study," *J. Manuf.*

- Syst.*, vol. 58, pp. 94–107, Jan. 2021, doi: 10.1016/J.JMSY.2020.04.013.
- [59] Y. Gao, D. Chang, C.-H. Chen, and Z. Xu, “Design of digital twin applications in automated storage yard scheduling,” *Adv. Eng. Informatics*, vol. 51, p. 101477, Jan. 2022, doi: 10.1016/J.AEI.2021.101477.
- [60] H. Latif, G. Shao, and B. Starly, “A Case Study of Digital Twin for a Manufacturing Process Involving Human Interactions,” *Proc. - Winter Simul. Conf.*, vol. 2020-December, pp. 2659–2670, Dec. 2020, doi: 10.1109/WSC48552.2020.9383897.
- [61] X. Liu, D. Jin, and T. Zhang, “Simulation-Based Evaluation of Handover Mechanisms in High-Speed Railway Control and Communication Systems,” *Proc. - Winter Simul. Conf.*, vol. 2020-December, pp. 3176–3187, Dec. 2020, doi: 10.1109/WSC48552.2020.9383954.
- [62] C.-H. Lee, L. Li, F. Li, and C.-H. Chen, “Requirement-driven evolution and strategy-enabled service design for new customized quick-response product order fulfillment process,” *Technol. Forecast. Soc. Change*, vol. 176, p. 121464, Mar. 2022, doi: 10.1016/J.TECHFORE.2021.121464.
- [63] M. Varl, J. Duhovnik, and J. Tavčar, “Customized product development supported by integrated information,” *J. Ind. Inf. Integr.*, vol. 25, p. 100248, Jan. 2022, doi: 10.1016/J.JII.2021.100248.
- [64] C. C. Ku, C. F. Chien, and K. T. Ma, “Digital transformation to empower smart production for Industry 3.5 and an empirical study for textile dyeing,” *Comput. Ind. Eng.*, vol. 142, p. 106297, Apr. 2020, doi: 10.1016/J.CIE.2020.106297.
- [65] F. S. Fogliatto, G. J. C. Da Silveira, and D. Borenstein, “The mass customization decade: An updated review of the literature,” *Int. J. Prod. Econ.*, vol. 138, no. 1, pp. 14–25, Jul. 2012, doi: 10.1016/J.IJPE.2012.03.002.
- [66] X. Wang, Y. Wang, F. Tao, and A. Liu, “New Paradigm of Data-Driven Smart Customisation through Digital Twin,” *J. Manuf. Syst.*, vol. 58, pp. 270–280, Jan. 2021, doi: 10.1016/J.JMSY.2020.07.023.
- [67] A. T. Espinoza Pérez, D. A. Rossit, F. Tohmé, and Ó. C. Vásquez, “Mass customized/personalized manufacturing in Industry 4.0 and blockchain: Research challenges, main problems, and the design of an information architecture,” *Inf. Fusion*, vol. 79, pp. 44–57, Mar. 2022, doi: 10.1016/J.INFFUS.2021.09.021.
- [68] Y. Qi, Z. Mao, M. Zhang, and H. Guo, “Manufacturing practices and servitization: The role of mass customization and product innovation capabilities,” *Int. J. Prod. Econ.*, vol. 228, p. 107747, Oct. 2020, doi: 10.1016/J.IJPE.2020.107747.
- [69] Y. Yao and Y. Xu, “Dynamic decision making in mass customization,” *Comput. Ind. Eng.*, vol. 120, pp. 129–136, Jun. 2018, doi: 10.1016/J.CIE.2018.04.025.
- [70] C. Zhang, D. Chen, F. Tao, and A. Liu, “Data Driven Smart Customization,” *Procedia CIRP*, vol. 81, pp. 564–569, Jan. 2019, doi: 10.1016/J.PROCIR.2019.03.156.
- [71] M. Liu, S. Fang, H. Dong, and C. Xu, “Review of digital twin about concepts, technologies, and industrial applications,” *J. Manuf. Syst.*, vol. 58, pp. 346–361, Jan. 2021, doi: 10.1016/J.JMSY.2020.06.017.
- [72] E. S. Okpoti and I. J. Jeong, “A reactive decentralized coordination algorithm for event-driven production planning and control: A cyber-physical production system prototype case study,” *J. Manuf. Syst.*, vol. 58, pp. 143–158, Jan. 2021, doi: 10.1016/J.JMSY.2020.11.002.
- [73] Z. Zhang, X. Wang, X. Zhu, Q. Cao, and F. Tao, “Cloud manufacturing paradigm with

- ubiquitous robotic system for product customization,” *Robot. Comput. Integr. Manuf.*, vol. 60, pp. 12–22, Dec. 2019, doi: 10.1016/J.RCIM.2019.05.015.
- [74] W. Xu, J. Cui, L. Li, B. Yao, S. Tian, and Z. Zhou, “Digital twin-based industrial cloud robotics: Framework, control approach and implementation,” *J. Manuf. Syst.*, vol. 58, pp. 196–209, Jan. 2021, doi: 10.1016/J.JMSY.2020.07.013.
- [75] S. Zeb, A. Mahmood, S. A. Hassan, M. J. Piran, M. Gidlund, and M. Guizani, “Industrial digital twins at the nexus of NextG wireless networks and computational intelligence: A survey,” *J. Netw. Comput. Appl.*, vol. 200, p. 103309, Apr. 2022, doi: 10.1016/J.JNCA.2021.103309.
- [76] G. Wang, G. Zhang, X. Guo, and Y. Zhang, “Digital twin-driven service model and optimal allocation of manufacturing resources in shared manufacturing,” *J. Manuf. Syst.*, vol. 59, pp. 165–179, Apr. 2021, doi: 10.1016/J.JMSY.2021.02.008.
- [77] C. Liu, L. Le Roux, C. Körner, O. Tabaste, F. Lacan, and S. Bigot, “Digital Twin-enabled Collaborative Data Management for Metal Additive Manufacturing Systems,” *J. Manuf. Syst.*, vol. 62, pp. 857–874, Jan. 2022, doi: 10.1016/J.JMSY.2020.05.010.
- [78] J. Cui, L. Ren, J. Mai, P. Zheng, and L. Zhang, “3D Printing in the Context of Cloud Manufacturing,” *Robot. Comput. Integr. Manuf.*, vol. 74, p. 102256, Apr. 2022, doi: 10.1016/J.RCIM.2021.102256.
- [79] P. Helo, Y. Hao, R. Toshev, and V. Boldosova, “Cloud manufacturing ecosystem analysis and design,” *Robot. Comput. Integr. Manuf.*, vol. 67, p. 102050, Feb. 2021, doi: 10.1016/J.RCIM.2020.102050.
- [80] C. Yu, S. Mou, Y. Ji, X. Xu, and X. Gu, “A delayed product differentiation model for cloud manufacturing,” *Comput. Ind. Eng.*, vol. 117, pp. 60–70, Mar. 2018, doi: 10.1016/J.CIE.2018.01.019.

