



**TÉCNICO**  
LISBOA

## **Proposta de metodologia de design de sistemas ciber-físicos**

Baseada na abordagem de design e desenvolvimento de produto

**Manuel António Alvim Sampaio Melo e Castro**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em  
**Engenharia Mecânica**

Orientador: Prof. Paulo Miguel Nogueira Peças

### **Júri**

Presidente: Prof. Rui Manuel dos Santos Oliveira Baptista

Orientador: Prof. Paulo Miguel Nogueira Peças

Vogais: Prof. Luís Miguel Veiga Vaz Caldas de Oliveira  
Prof. Marco Alexandre de Oliveira Leite

**Julho 2020**



## RESUMO

O sistema ciber físico (CPS) é um elemento basilar da Indústria 4.0. Foram publicados vários artigos na última década no âmbito da Indústria 4.0 e dos CPS, o que indica que são temas cada vez mais importantes no mundo académico e no mundo industrial. Particularmente, a engenharia de CPS é um tópico que tem vindo a ser cada vez mais abordado, por possibilitar a integração de capacidades computacionais aos contextos físicos, desbloqueando capacidades nos sistemas de engenharia em muito superiores às dos sistemas tradicionais. É por isso que os CPS entram em jogo como um conceito tecnológico de amplo impacto em setores como a produção, o transporte, a saúde e a energia.

Para acompanhar esta corrente de inovação, é fundamental que exista uma metodologia que guie devidamente todo o processo de criação, construção e implementação de um CPS. Já existem metodologias que abordam os aspetos essenciais do design. No entanto, não existe nenhuma metodologia que concirna devidamente a realidade particular de uma empresa, que a ajude a compreender a natureza do seu negócio e a sua forma de interação com o mercado, a fim de identificar oportunidades onde a utilização de recursos de CPS pudesse melhorar a performance da empresa. Ou seja, não foi encontrado na literatura um guia de criação e desenvolvimento conceptual de um CPS que seja ajustado às necessidades de produção, de operações e de negócio de uma empresa. O CPS é, por definição, um sistema complexo, que pode incluir ferramentas e capacidades escolhidas entre uma grande lista de alternativas, de diversos graus de maturidade, diferentes níveis de complexidade tecnológica, que implicam níveis de investimento distintos. Quando se trata de investir num sistema destes, inevitavelmente surge a dificuldade de compreender que ferramentas e capacidades são realmente necessárias para a empresa em causa. Além disso, muitas vezes nem se sabe por onde começar, e muitas vezes cometem-se erros ao investir em tecnologia que não é inteiramente necessária.

Assim, a presente dissertação propõe uma abordagem de metodologia de design e desenvolvimento de CPS, baseada nos métodos de design e desenvolvimento de produto genérico (PDD). Pretende-se demonstrar que ao considerar que o produto neste caso é o CPS e seguindo os vários métodos, passos e lógicas de PDD, o resultado pode ser um CPS mais ajustado às necessidades reais da organização. Por outras palavras, propõe-se o seguinte critério: faz sentido investir num CPS se este ajudar a organização a melhor desempenhar o seu modelo de negócio. A proposta divide-se em duas grandes partes: o projeto conceptual ao nível macro do sistema geral e o projeto de implementação e construção ao nível micro dos subsistemas e seus blocos de componentes. A apresentação da mesma é realizada à medida que se elaboram exemplos de aplicação a um caso de estudo e se tiram conclusões relacionadas.

**Palavras-chave:** sistema ciber-físico, design e desenvolvimento de produto, modelo de negócio, necessidades de operações e produção, design de sistemas ciber-físicos, Indústria 4.0.

## ABSTRACT

The cyber-physical system (CPS) is a pillar of Industry 4.0. Several articles have been published in the last decade about Industry 4.0 and CPS, which indicates that they are increasingly important topics in the academic world and in the industrial world. Particularly, CPS engineering is a topic that has been increasingly addressed, as it allows the integration of computational capacities to physical contexts, unlocking sophisticated capacities in engineering systems. That is why CPS enter this scenario as a technology of wide impact in sectors such as production, transport, health and energy.

To keep up with this innovation stream, a methodology that properly guides the entire process of creating, designing, building and implementing a CPS is needed. There are already methodologies that address the essential aspects of CPS design. However, there is no methodology that properly concerns the particular reality of a company, helping it to understand the nature of its business and its way of market interaction, in order to identify opportunities where the use of CPS resources could improve the company's performance. In other words, it was not found in the literature a guide for the creation and conceptual development of a CPS that is adjusted to needs of a company's production, operations and business. A CPS is, by definition, a complex system, which may include tools and capabilities chosen from a large list of alternatives. These alternatives vary across degrees of maturity and different levels of technological complexity, which imply distinct levels of investment. When it comes to invest in such a system, there is inevitably a difficulty in understanding what tools and capabilities are really necessary for the company. Furthermore, it is often not even known where to start, and mistakes are usually made when investing in technology that is expensive and not entirely needed.

Thus, this dissertation proposes the first CPS design and development methodology approach based on generic product design and development (PDD) methods. It is intended to demonstrate that when a development team considers the product in this case is the CPS itself, and also follows the various methods, steps and logics of PDD, the result can be a CPS more adjusted to the real needs of the organization. In other words, the following criterion is proposed: it makes sense to invest in a CPS if it helps the organization to better perform its business model. The proposal is divided into two main parts: a conceptual project at the macro level of the general system and an implementation and construction project at the micro level of the subsystems and their components. The proposal is presented along with examples of a case study application and related conclusions.

**Keywords:** cyber-physical system, product design and development, business model, operational and production needs, design of cyber-physical systems, Industry 4.0.

# ÍNDICE DE CONTEÚDOS

Resumo .....	iii
Abstract.....	iv
Índice de figuras .....	viii
Índice de tabelas .....	ix
Lista de acrónimos .....	x
1. Introdução .....	1
2. Indústria 4.0 e sistemas ciber-físicos.....	2
2.1. Indústria 4.0.....	2
2.1.1. Revoluções industriais.....	2
2.1.2. Indústria 4.0 .....	3
2.1.3. <i>Smart Manufacturing</i> na Indústria 4.0.....	4
2.1.4. Princípios de Design da Indústria 4.0 .....	5
2.1.5. Conceitos Tecnológicos da Indústria 4.0.....	7
2.2. Sistemas Ciber-Físicos.....	9
2.2.1. Conceito de CPS .....	10
2.2.2. Componentes, funcionalidades e requisitos de CPS .....	12
2.3. Abordagens existentes sobre o Design de CPS .....	22
2.3.1. Metodologias de Design de CPS.....	22
2.3.2. Aplicabilidade e limitações.....	25
2.4. Conclusões .....	27
3. O design e desenvolvimento de produto (PDD) aplicado ao sistema ciber-físico.....	28
3.1. Introdução à aplicação do método PDD ao Design e Desenvolvimento de CPS.....	28
3.2. Aplicabilidade das fases do processo de PDD.....	30
3.2.1. Fase 0 – Planeamento.....	31
3.2.2. Fase I – Desenvolvimento de conceitos .....	31
3.2.3. Fase II – Design ao nível do sistema.....	32
3.2.4. Fase III – Design ao nível do detalhe .....	32
3.2.5. Fase IV – Testes e refinamento.....	33
3.2.6. Fase V – <i>Ramp-up</i> de produção.....	33

3.3.	Aplicabilidade das etapas do processo de PDD .....	34
3.3.1.	Etapa 1 – Identificação de oportunidades .....	34
3.3.2.	Etapa 2 – Planeamento de produtos .....	35
3.3.3.	Etapa 3 – Identificação de necessidades .....	36
3.3.4.	Etapa 4 – Elaboração das especificações alvo .....	37
3.3.5.	Etapa 5 – Geração de conceitos .....	38
3.3.6.	Etapa 6 – Seleção de conceitos .....	39
3.3.7.	Etapa 7 – Testes de conceitos .....	40
3.3.8.	Etapa 8 – Definição das especificações finais .....	40
3.3.9.	Etapa 9 – Planeamento de projeto .....	42
3.3.10.	Etapa 10 – Definição da arquitetura de produto .....	43
3.3.11.	Etapa 11 – Design de produto .....	45
3.3.12.	Etapa 12 – Prototipagem .....	48
3.3.13.	Etapa 13 – Execução de projeto.....	50
3.4.	Análise geral.....	51
4.	Proposta de metodologia de design e desenvolvimento de sistemas ciber-físicos (CPSDD).....	52
4.1.	Abordagem metodológica e estrutura do capítulo.....	52
4.2.	Introdução ao caso de estudo .....	53
4.3.	Design conceptual de CPS.....	56
4.3.1.	Etapa 1 – Identificação de Oportunidades do BM .....	56
4.3.2.	Etapa 2 – Planeamento de pré-projeto.....	57
4.3.3.	Etapa 3 – Identificação de necessidades .....	60
4.3.4.	Etapa 4 – Elaboração de especificações alvo .....	62
4.3.5.	Etapa 5 – Geração de conceitos .....	65
4.3.6.	Etapa 10 – Definição conceptual da arquitetura de CPS .....	67
4.3.7.	Etapas 6 e 7 – Seleção e testes de conceitos.....	69
4.3.8.	Etapas 11 e 12 – Design de produto e prototipagem .....	72
4.3.9.	Etapa 9 – Planeamento de projeto .....	72
4.4.	Do conceito à implementação (subprojetos) .....	73
4.5.	Análise geral.....	79
5.	Conclusão e futuros passos.....	79

Referências .....	81
Anexos.....	A
A.    Metodologias de Design de CPS (capítulo 2) .....	A
Metodologia de design de CPS baseado em serviços .....	A
Metodologia de design de CPS baseado em modelos (MBD) .....	A
B.    Conteúdos de PDD aplicáveis ao CPS (capítulo 3) .....	D
Etapa 13 – Execução de projeto .....	D
C.    Etapas da proposta de metodologia de design conceptual de CPS (capítulo 4) .....	E
Etapa 1 – Identificação de Oportunidades do BM .....	E
Etapa 2 – Planeamento de pré-projeto de CPS.....	F
Etapa 3 – Identificação de necessidades .....	G
Etapa 4 – Elaboração de especificações alvo .....	I
Etapa 5 – Geração de conceitos.....	J
Etapa 10 – Definição conceptual da Arquitetura de CPS .....	L
D.    Descrição das etapas da VC da família de produtos da Empresa A (capítulo 4) .....	M
E. <i>Outputs</i> do Caso de Estudo (capítulo 4) .....	O
Etapa 3 – Identificação de necessidades .....	O
Etapa 4 – Elaboração de especificações alvo .....	R
Etapa 10 – Definição conceptual da arquitetura de CPS.....	R

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – <i>Smart Manufacturing</i> vinculada aos quatro componentes chave da Indústria 4.0 [1]. .....	4
Figura 2.2 – Princípios de design da Indústria 4.0, adaptado de [27]. .....	6
Figura 2.3 – Arquitetura do CPS baseado em serviços [50]. .....	13
Figura 2.4 – Arquitetura de CPS de 8C, adaptado de [52]. .....	15
Figura 2.5 – Arquitetura de CPS de componentes 3C, adaptado de [21]. .....	17
Figura 2.6 – Modelo CPS Final: Esquema resumo dos componentes, funcionalidades e requisitos... ..	21
Figura 3.1 – Lógica da sequência das 6 fases e 13 etapas de PDD, adaptado de [77]. .....	30
Figura 4.1 – Lógica e estrutura do capítulo 4. .....	53
Figura 4.2 – Apresentação da Empresa A. .....	53
Figura 4.3 – <i>Layout</i> simplificado da unidade de transformação de madeira da Empresa A. ....	54
Figura 4.4 – Mapeamento esquemático da VC atual da família de produtos selecionada. ....	55
Figura 4.5 – Passos e principal <i>output</i> da Etapa 1. ....	56
Figura 4.6 – Passos e principal <i>output</i> da Etapa 2. ....	57
Figura 4.7 – Exemplo de formato de planeamento do <i>Roadmap</i> e da Equipa (E2 – P2 e P3). ....	58
Figura 4.8 – Passos e principal <i>output</i> da Etapa 3. ....	60
Figura 4.9 – Passos e principal <i>output</i> da Etapa 4. ....	62
Figura 4.10 – Passos e principal <i>output</i> da Etapa 5. ....	65
Figura 4.11 – Passos e principal <i>output</i> da Etapa 10. ....	68
Figura 4.12 – Esquema para a arquitetura conceptual de CPS do Conceito A (E5 e E10). ....	70
Figura 4.13 – Complementação do MBD com etapas do PDD e correspondência das fases. ....	74
Figura A – 1. Fases de design do CPS baseado em serviços, adaptado de [41], [50]. .....	A
Figura E – 1. <i>Layout</i> de organização de recursos pelas respetivas secções (E10 – P1). .....	R
Figura E – 2. Arquitetura de CPS do Conceito C (E5 e E10). .....	T



## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 – Disciplinas de <i>Smart Manufacturing</i> , adaptado de [20]–[22].	5
Tabela 2.2 – Princípios de Design (P) da Indústria 4.0, adaptado de [27].	6
Tabela 2.3 – Conceitos Tecnológicos da Indústria 4.0, adaptado de [16], [29], [30].	8
Tabela 2.4 – Aspectos essenciais do conceito de CPS, baseados nos parágrafos anteriores.	12
Tabela 2.5 – Descrição das 3 camadas Arquitetura do CPS baseado em serviços [50].	13
Tabela 2.6 – Descrição das 5 camadas da Arquitetura do CPS baseada em SOA [55].	14
Tabela 2.7 – Descrição dos níveis da Arquitetura ISA-95, adaptado de [56].	14
Tabela 2.8 – Medidas de ação dos níveis da arquitetura de 5C, adaptado de [51].	14
Tabela 2.9 – Medidas de ação dos níveis 3C, adaptado de [52].	16
Tabela 2.10 – Recursos de CPS relativos aos Componentes 3C, adaptado de [59] e [21].	18
Tabela 2.11 – Medidas de ação relativas às interfaces dos 3C, adaptado de [21].	18
Tabela 2.12 – Lista de requisitos do CPS, adaptado de [39], [61], [62].	20
Tabela 2.13 – Três fases do processo de desenvolvimento do CPS, adaptado de [41], [62].	23
Tabela 2.14 – Recursos essenciais para o design de CPS, adaptado de [68].	23
Tabela 2.15 – Dez etapas do design de CPS baseado em modelos (MBD) [64].	24
Tabela 3.1 – Análise da utilidade de um processo de PDD bem elaborado.	29
Tabela 3.2 – Tipos de mudanças nos produtos, facilitadas pela modularidade da arquitetura [77].	43
Tabela 3.3 – Categorização de protótipos consoante a finalidade e a tecnologia, adaptado de [77].	48
Tabela 3.4 – Protótipos de aprovação de marcos importantes, adaptado de [77].	49
Tabela 4.1 – Problemas e oportunidades de melhoria gerais da Empresa A.	54
Tabela 4.2 – Declarações finais de oport. de CPSDD, por ordem de prioridade (E1 – P4 e P5).	57
Tabela 4.3 – Declaração de Missão do Projeto de CPSDD da Empresa A (E2 – P1).	59
Tabela 4.4 – Descrições resumidas das etapas (e) da VC organizadas para a E3 – P2.	61
Tabela 4.5 – Matriz de identificação sistemática de necessidades da Empresa A (E3 – P2).	61
Tabela 4.6 – Exemplo de interpretação de necessidades de CPS (E3 – P2).	61
Tabela 4.7 – Macro-necessidades e respetivas micro-necessidades de CPS (E3 – P3).	62
Tabela 4.8 – Matriz de correspondência entre necessidades e métricas.	63
Tabela 4.9 – Lista de níveis estabelecidos para as métricas (E4 – P2).	64
Tabela 4.10 – Matriz de geração de conceitos (E5 – P4).	66
Tabela 4.11 – Exemplo de compêndio de informação relativa ao Conceito A (E10 – P1).	68
Tabela 4.12 – Análise comparativa de conceitos (E7).	71
Tabela A – 1. Descrição detalhada das dez etapas do MBD de CPS [64].	A
Tabela B – 1. Ações de gestão e execução de projetos, ao longo de três vetores adaptado de [77].	D
Tabela E – 1. Interpretação de necessidades de CPS (E3 – P2).	O
Tabela E – 2. Organização hierárquica de necessidades e avaliação (E3 – P3, P4)	Q
Tabela E – 3. Lista de necessidades do CPS 1.1 (E3 e E4).	R
Tabela E – 4. Componentes e Funcionalidades do Conceito A (E10).	S

## LISTA DE ACRÓNIMOS

Os acrónimos foram utilizados fazendo jus aos termos em inglês e ao seu uso na literatura consultada.

<b>AML</b>	<i>Automation Markup Language</i>	Linguagem de Marcação de Automação
<b>APS</b>	<i>Advanced Planning System</i>	Sistema de Planeamento Avançado
<b>AR</b>	<i>Augmented Reality</i>	Realidade Aumentada
<b>CAD</b>	<i>Computer-Aided Design</i>	Design Assistido por Computador
<b>CAM</b>	<i>Computer-Aided Manufacturing</i>	Fabrico Assistido por Computador
<b>CC</b>	<i>Cyber Component</i>	Componente Ciber
<b>CCP</b>	<i>Cloud Computing Platforms</i>	Plataformas de Computação em <i>Cloud</i>
<b>CCPS</b>	<i>Cloud integrated Cyber-Physical System</i>	Sistema Ciber-Físico Integrado na <i>Cloud</i>
<b>CMM</b>	<i>Coordinate Measuring Machine</i>	Máquina de Medição de Coordenadas
<b>CMMS</b>	<i>Computerized Maintenance Management System</i>	Sistema de Gestão de Manutenção Computadorizada
<b>CPI</b>	<i>Cyber-Physical Interface</i>	Interface Ciber-Física
<b>CPPS</b>	<i>Cyber Physical Production System</i>	Sistema de Produção Ciber-Físico
<b>CPS</b>	<i>Cyber-Physical System</i>	Sistema Ciber-Físico
<b>CPSDD</b>	<i>Cyber-Physical System Design and Development</i>	Design e Desenvolvimento de Sistemas Ciber-físicos
<b>CRM</b>	<i>Client Relation Management</i>	Gestão de Relacionamento com Clientes
<b>CS</b>	<i>Control System</i>	Sistema de Controlo
<b>VC</b>	<i>Value Chain</i>	Cadeia de Valor
<b>eVC</b>	<i>e-Value Chain</i>	Cadeia de Valor Eletrónica
<b>DCS</b>	<i>Distributed Control System</i>	Sistema de Controlo Distribuído
<b>DSM</b>	<i>Design Structure Matrix</i>	Matriz de Estrutura de Design
<b>ERP</b>	<i>Enterprise Resource Planning</i>	Planeamento de Recursos Empresariais
<b>GRACE</b>	<i>InteGration of pRocess and quAlity Control using multi-agEnt technology</i>	Integração de Controlo de Processo e Qualidade utilizando Tecnologia MAS
<b>H2H</b>	<i>Human-to-Human</i>	Humano-a-Humano
<b>HC</b>	<i>Human Component</i>	Componente Humano
<b>HCI</b>	<i>Human-Ciber/Computer Interface</i>	Interface Humano-Ciber/Computador
<b>HMD</b>	<i>Head/Helmet Mounted Display</i>	Dispositivo de Exibição Montável na Cabeça/Capacete
<b>HMI</b>	<i>Human-Machine Interfaces</i>	Interfaces Homem-Máquina
<b>HRM</b>	<i>Human Resources Management</i>	Gestão de Recursos Humanos
<b>IAS</b>	<i>Industrial Automation Systems</i>	Sistemas de Automação Industrial
<b>ICT</b>	<i>Information and Communication Technologies</i>	Tecnologias de Informação e Comunicação
<b>ICCT</b>	<i>Information, Communication and Control Technologies</i>	Tecnologias de Informação, Comunicação e Controlo
<b>IS</b>	<i>Information System</i>	Sistema de Informação
<b>IoE</b>	<i>Internet of Everything</i>	Internet de Tudo
<b>IoP</b>	<i>Internet of Products</i>	Internet de Produtos
<b>IoT</b>	<i>Internet of Things</i>	Internet das Coisas
<b>IPdM</b>	<i>Intelligent Predictive Maintenance</i>	Manutenção Preditiva e Inteligente
<b>ISPS</b>	<i>Industrial Software-Product-Service</i>	Software-Produto-Serviço Industrial

<b>IT</b>	<i>Information Technologies</i>	Tecnologias de Informação
<b>M2H</b>	<i>Machine-to-Human</i>	Máquina-a-Humano
<b>M2M</b>	<i>Machine-to-Machine</i>	Máquina-a-Máquina
<b>MAS</b>	<i>Multi-Agent System</i>	Sistema Multi-Agente
<b>MBD</b>	<i>Model-Based Design</i>	Design Baseado em Modelos
<b>MBSE</b>	<i>Model-Based Systems Engineering</i>	Engenharia de Sistemas baseados em Modelos
<b>MES</b>	<i>Manufacturing Execution Systems</i>	Sistemas de Execução de Manufatura
<b>BM</b>	<i>Business Model</i>	Modelo de Negócio
<b>BMC</b>	<i>Business Model Canvas</i>	Quadro do Modelo de Negócio
<b>MRO</b>	<i>Maintenance, Repair and Overhaul</i>	Manutenção, Reparo e Inspeção
<b>MTO</b>	<i>Make-to-order</i>	Fabrico-para-encomenda
<b>MTS</b>	<i>Make-to-stock</i>	Fabrico-para-armazenamento
<b>MVCE</b>	<i>Model-View-Controller Environment</i>	Contexto de Modelo-Visualização-Controlo
<b>MWSN</b>	<i>Mobile Wireless Sensor Network</i>	Redes de Sensores Móveis Sem-Fios
<b>PC</b>	<i>Physical Component</i>	Componente Físico
<b>PDD</b>	<i>Product Design and Development</i>	Design e Desenvolvimento de Produto
<b>PERT</b>	<i>Program Evaluation and Review Technique</i>	Técnica de Revisão e Avaliação do Programa
<b>PHM</b>	<i>Prognostics and Health Management</i>	Gestão de Prognósticos e Robustez
<b>PIMS</b>	<i>Production Information Management System</i>	Sistema de Gestão de Informações de Produção
<b>PLC</b>	<i>Programmable-Logic Controller</i>	Controlador Lógico Programável
<b>PLM</b>	<i>Product Lifecycle Management</i>	Gestão do Ciclo de Vida do Produto
<b>QFD</b>	<i>Quality Function Deployment</i>	Desdobramento da Função Qualidade
<b>RCS</b>	<i>Resilient Control System</i>	Sistema de Controlo Resiliente
<b>RDF</b>	<i>Resource Description Framework</i>	Metodologia de Descrição de Recursos
<b>RFID</b>	<i>Radio-Frequency Identification</i>	Identificação por Frequência Rádio
<b>SCADA</b>	<i>Supervisory Control and Data Acquisition</i>	Sistema de Controlo de Supervisão e Aquisição de Dados
<b>SCC</b>	<i>Sense-Compute-Control</i>	Sensorizar-Calcular-Controlar
<b>SCM</b>	<i>Supply Chain Management</i>	Gestão da Cadeia de Abastecimento
<b>SM</b>	<i>Smart Manufacturing</i>	Manufatura Inteligente
<b>SOA</b>	<i>Service-Oriented Architecture</i>	Arquitetura Baseada em Serviços
<b>SoC</b>	<i>System on Chip</i>	Sistema em Chip
<b>SURF</b>	<i>Subject-oriented suggestions for Redesign of Factory</i>	Sugestões Orientadas a Sujeitos para Redesign de Fábrica
<b>TUI</b>	<i>Tangible User Interface</i>	Interface Tangível de Usuário
<b>VR</b>	<i>Virtual Reality</i>	Realidade Virtual
<b>WFM</b>	<i>WorkFlow Manager</i>	Gestor de Fluxo de Trabalho
<b>WMS</b>	<i>Warehouse Management System</i>	Sistema de Gestão de Armazém
<b>ZDM</b>	<i>Zero Defect Manufacturing</i>	Manufatura de Zero Defeitos

# 1. INTRODUÇÃO

O sistema ciber-físico (CPS) é uma das bases da *Smart Factory* que é o coração da mais recente e popular corrente de inovação tecnológica e industrial, que acompanha a Quarta Revolução Industrial, e tem por nome “Indústria 4.0” [1], [2]. Há quem afirme mesmo que os CPS são o coração da Indústria 4.0 [3]. Vários artigos foram publicados na última década, no âmbito da Indústria 4.0 e dos CPS, o que indica que são temas cada vez mais sérios no mundo académico e no mundo industrial. Particularmente, a engenharia de CPS é um tópico que tem vindo a ser cada vez mais abordado, por possibilitar a integração de capacidades computacionais aos contextos físicos, desbloqueando capacidades nos sistemas de engenharia em muito superiores às capacidades dos sistemas tradicionais. É por isso que os CPS entram em jogo como uma tecnologia de amplo impacto [4] em setores como a produção, o transporte, a saúde e ou a energia [5]–[7].

Para acompanhar esta corrente de inovação, é fundamental que exista uma metodologia que guie devidamente todo o processo de criação, construção e implementação de um CPS. Este é, por definição, um sistema complexo, que pode incluir ferramentas e capacidades escolhidas entre uma grande lista de alternativas, de diversos graus de maturidade, diferentes níveis de complexidade tecnológica e implicando níveis de investimento diferentes. Quando se trata de investir num sistema destes, inevitavelmente surge a dificuldade de compreender que ferramentas e capacidades são realmente necessárias para a empresa em causa. Além disso, no meio de tantas oportunidades de inovação, muitas vezes nem se sabe por onde começar, e muitas vezes cometem-se erros de investir em tecnologia que não é inteiramente necessária.

Assim, a presente dissertação tem como objetivo final e principal propor uma nova abordagem de metodologia que guie o Design e o Desenvolvimento de um CPS (CPSDD) ajustado às necessidades reais de produção e operações da organização que o desenvolve. Propõe-se o seguinte critério: só faz sentido investir num CPS que ajude a organização a melhor desempenhar o seu modelo de negócio (BM). Para atingir este fim, são estabelecidos vários objetivos intermédios para cada capítulo.

O capítulo 2 apresenta uma revisão de literatura com dois objetivos. Em primeiro lugar, compreender o que é, como funciona e como é constituído um CPS. Para isso é relevante estudar o paradigma de Indústria 4.0, a fim de entender os seus princípios e fundamentos, e de como é que o CPS nele se enquadra. Em segundo lugar, investigar abordagens existentes de design e desenvolvimento de CPS, a fim de analisar a adequabilidade de cada metodologia proposta, identificar a lacuna da literatura e sustentar a conveniência da presente proposta. A sistematização de informação apresentada em todo o capítulo 2 demonstra ser útil para a realização da proposta de metodologia.

O capítulo 3 tem como objetivo principal demonstrar que a generalidade dos diferentes métodos, passos, processos e lógica de Design e Desenvolvimento de Produto genérico (PDD) são aplicáveis ao CPSDD. Além da aplicabilidade, introduz-se a utilidade desta abordagem face à dificuldade referida acima e à lacuna identificada na literatura.

No capítulo 4 pretende-se alcançar o objetivo final da dissertação. A proposta de metodologia divide-se em duas grandes partes: projeto de design conceptual e projeto do conceito à implementação. A apresentação é realizada à medida que se expõem exemplos de aplicação a um caso de estudo e se tiram conclusões.

No fim de cada capítulo são apresentadas as respetivas conclusões e análises gerais. Finalmente, no capítulo 5, chega-se às conclusões finais da dissertação e declaram-se os futuros passos.

## 2. INDÚSTRIA 4.0 E SISTEMAS CIBER-FÍSICOS

O objetivo deste capítulo é averiguar se existe na Literatura uma metodologia de design adequada à realidade das empresas industriais, que parta do princípio da identificação de necessidades da organização, e guie de forma simples e completa as etapas de CPSDD. Partindo de uma compreensão simples do paradigma industrial de *Smart Manufacturing* e dos princípios basilares da Indústria 4.0 onde é erguido o CPS, é fundamental entender o que expõe a literatura sobre o modelo conceptual de componentes e funcionalidades de CPS, para depois conseguir elaborar uma sistematização de informação. O capítulo termina com o estudo de algumas metodologias de design de CPS apresentadas na última década, culminando numa análise de aplicabilidade e limitações das mesmas.

### 2.1. INDÚSTRIA 4.0

#### 2.1.1. REVOLUÇÕES INDUSTRIAIS

Desde o início da industrialização, os saltos tecnológicos levaram a mudanças de paradigma que hoje são denominadas "revoluções industriais" [8]. Essas mudanças transformaram os processos de fabrico tornando-os mais sofisticados, automáticos e sustentáveis, possibilitando assim a operabilidade de máquinas cada vez mais simples, eficiente e contínua [9], [10]. Marcada pela invenção do primeiro tear mecânico em 1784, a Primeira Revolução Industrial seguiu-se à introdução de motores movidos a água e a vapor, resultando depois na criação das primeiras instalações de fabrico mecânico [11], o que levou a que a atividade humana alterasse o seu foco principal da agricultura para a indústria, dando assim início ao primeiro paradigma de sociedade industrial [12]. Erol *et al.* [11] afirmam que a Segunda Revolução Industrial deflagrou massivamente no início do século XX, mas teve como primórdio a criação da primeira linha de produção no matadouro de Cincinnati (Ohio, EUA) em 1870. A descoberta e utilização da eletricidade levou à introdução da produção elétrica em massa com capacidades nunca antes vistas, acompanhada pelo conceito revolucionário da divisão do trabalho [13]. Já a Terceira Revolução Industrial, muitas vezes denominada de 'revolução digital' ou 'revolução tecnocientífica', é caracterizada por várias inovações tecnológicas como a mudança de analógico para digital. Datada entre 1950 e 1970 [12], a Terceira Revolução teve como marco principal a introdução do primeiro controlador lógico programável (PLC), Modicon 084 em 1969 [11] que antevia as práticas de automação de processos através de controladores programáveis e dos primeiros computadores.

Após estas três mudanças paradigmáticas, chegou a hora da última e atual Revolução. De acordo com [14], o mundo industrial está a ser transformado pela Quarta Revolução Industrial. Segundo Lasi *et al.* [10], mediante uma digitalização avançada em fábricas, a combinação das Tecnologias da Informação e Comunicação (ICT) com as tecnologias de futuro nos campos dos *Smart Objects* (máquinas e produtos inteligentes), parece resultar numa nova mudança de paradigma fundamental na produção industrial. Esta Revolução é bastante diferente das outras por ser a primeira que é abordada antes de realmente acontecer ou de estar largamente implementada [15]. Isto abre um grande leque de oportunidades para qualquer tipo de negócio que esteja interessado em participar nesta nova corrente de inovação [13].

## 2.1.2. INDÚSTRIA 4.0

Derivado desta expectativa futura, o termo “Indústria 4.0” foi estabelecido *ex ante* para uma Quarta Revolução Industrial planeada [10]: o conceito foi introduzido em 2011 pelo governo alemão como uma das principais iniciativas da nova estratégia *high-tech* alemã [16], sendo veementemente recomendada a sua implementação o que levou a uma rápida expansão do conceito [10]. Desde então, foi realizado muito trabalho de investigação para desenvolver a ideia e houve várias tentativas para a definir [13]. Ibarra *et al.* [17] em 2018 afirmaram que “*a crescente fusão da produção industrial e das ICT trouxe a Indústria 4.0 para o mundo da manufatura*”, que comparando com o que escreveram Lazi *et al.* [10] (ver subcapítulo 2.1.1) e reparando nas semelhanças, indica em primeira instância que o termo “Indústria 4.0” tem as suas bases na Quarta Revolução Industrial.

Existem muitas designações para a Quarta Revolução na Literatura. Nesta dissertação o termo escolhido é o mais usual na Literatura, “Indústria 4.0”, cuja definição apresentada de seguida permite concluir que este termo remete para a Quarta Revolução Industrial. Não obstante, a Quarta Revolução não é só por si a Indústria 4.0, como se pode concluir pela definição seguinte. De acordo com o que escreveram Herman *et al.* em 2015 [18], a Indústria 4.0 é “*um termo coletivo designado para tecnologias e conceitos de organização da cadeia de valor (VC). Nas Fábricas Inteligentes da Indústria 4.0, estruturadas e modulares, o sistema ciber físico (CPS) monitoriza os processos físicos, cria uma cópia virtual do mundo físico e toma decisões descentralizadas. Na Internet das Coisas (IoT), o CPS comunica e coopera entre si e com os seres humanos em tempo real. Por meio da IoT, serviços internos e entre organizações são oferecidos e utilizados pelos participantes da VC*”. Ou seja, a Indústria 4.0 é mais do que o “salto tecnológico” nos processos da indústria produtiva.

De acordo com o estudo realizado pelo colega Amaral [13], a Indústria 4.0 possui várias áreas de desenvolvimento, mas a Integração Horizontal de todos os intervenientes da VC e a Integração Vertical de todas as camadas de cada um desses intervenientes revelam ser as mais importantes. O relatório elaborado pela Associação Digital Alemã Bitkom [14] fornece uma definição para os dois conceitos. A Integração horizontal consiste na integração de vários sistemas de Tecnologias de Informação (IT) para o suporte e/ou execução de diferentes processos de valor (por exemplo, produção, logística, marketing, engenharia, serviços), dentro ou para além dos limites físicos e virtuais de uma empresa de produção. Esta integração oferece, portanto, uma solução de um extremo ao outro. Numa outra orientação, a Integração Vertical consiste na integração dos diferentes sistemas de IT nos diferentes níveis hierárquicos de um sistema de produção, e nos diferentes níveis desses sistemas de produção na solução final (por exemplo e por ordem hierárquica crescente: atuador e sensor, controlador, gestão da produção, manufatura, execução e planeamento corporativo).

Ibarra *et al.* [17] prosseguem o seu artigo assegurando que o fenómeno da Indústria 4.0 possibilita a ligação de objetos, pessoas e informação por efeito da convergência do mundo físico e do mundo virtual (ciberespaço), na forma dos chamados CPS. No mesmo ano, Al-Ali *et al.* declararam que, atualmente, os CPS são o coração da Indústria 4.0 [3]. Outros autores concluíram mesmo que o início da Quarta Revolução Industrial é marcado principalmente pelo uso de CPS [2]. Conclui-se assim que, uma vez que ingressar na corrente de inovação da Indústria 4.0 é um fator crítico de competitividade de um negócio de Indústria de Produção, e sendo o CPS um componente essencial da *Smart Factory*, que por sua vez é pedra basilar da Indústria 4.0 [1], [2], é essencial construir e operacionalizar o CPS na

VC e nos negócios. Posto isto, no subcapítulo seguinte é introduzido o conceito de *Smart Manufacturing* (Manufatura Inteligente), que é central na Indústria 4.0, e onde o CPS é mais uma vez evidenciado.

### 2.1.3. SMART MANUFACTURING NA INDÚSTRIA 4.0

Em 2019, Yao *et al.* [1] assinalaram que à semelhança da estratégia Alemã, a organização americana *Smart Manufacturing Leadership Coalition* trabalhou num novo paradigma de manufatura, chamado *Smart Manufacturing*, que consiste na operacionalização das práticas de geração e aplicação de dados e inteligência de fabrico ao longo de todo o ciclo de vida do produto, com a ampla adoção de tecnologia avançada de sensores, controlo, modelação e plataformas de engenharia [1], [19]. Dos quatro componentes chave da Indústria 4.0 identificados no artigo [1], que são a IoT, a IoS, a *Smart Factory* e o CPS, o último é identificado como o mais proeminente. Por esse motivo, os componentes mencionados acima estão relacionados e ligados como indica a ilustração da Figura 2.1, onde a *Smart Manufacturing* é parte central da Indústria 4.0, e por sua vez, a *Smart Factory* é parte da *Smart Manufacturing*. Além disso, o CPS pode ser visto como a combinação da IoT e da IoS. Assim sendo, é possível concluir que a Indústria 4.0 é compreendida como tendo base no CPS [1].

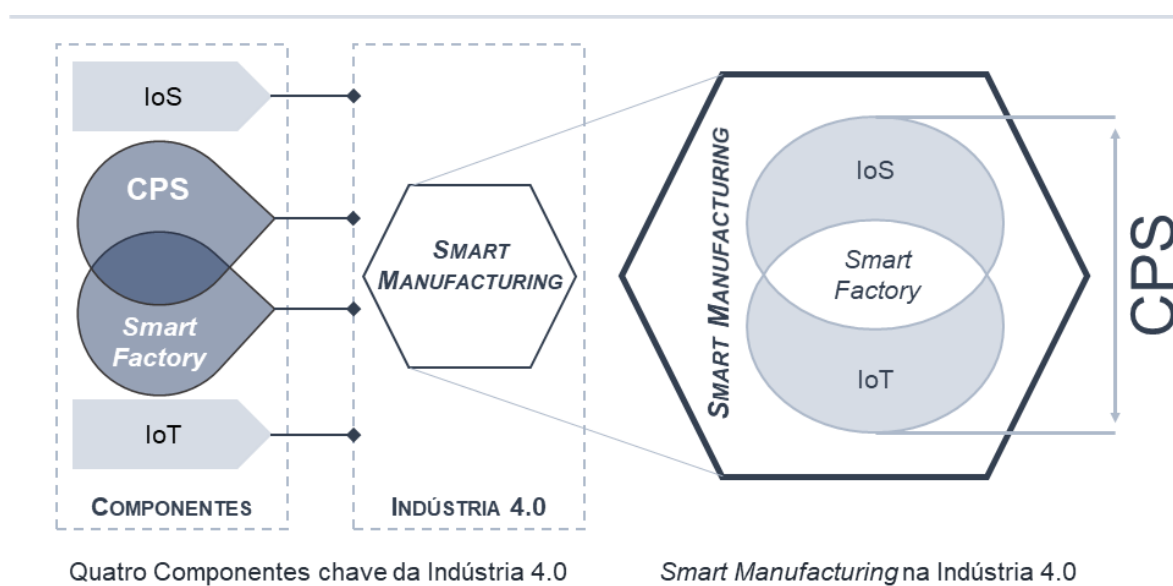


Figura 2.1 – *Smart Manufacturing* vinculada aos quatro componentes chave da Indústria 4.0 [1].

Segundo Zheng [20], a *framework* dos sistemas de *Smart Manufacturing* da Indústria 4.0 inclui *Smart Design*, *Smart Machines*, *Smart Monitoring*, *Smart Control* e *Smart Scheduling*. Estas disciplinas de trabalho são descritas na Tabela 2.1 e descrevem métodos que são importantes para a metodologia de CPSDD proposta nesta dissertação. Ahmadi *et al.* [21] e Gorecky *et al.* [22] referem os conceitos de *Smart Product* e *Smart Control*, também relevantes e referenciados por outros autores como [23], [24], e é por isso que foram também incluídos na Tabela 2.1. Nota: poderiam ter sido incluídas neste estudo outras disciplinas, que de um modo ou outro se enquadram nas seis escolhidas (e.g. *Smart Devices*).

Tabela 2.1 – Disciplinas de *Smart Manufacturing*, adaptado de [20]–[22].

DISCIPLINA	DESCRIÇÃO
<b>SMART DESIGN</b>	Design inteligente – tecnologias como Realidade Virtual (VR) e Realidade Aumentada (AR) podem ser usadas para uma interface entre o trabalhador e o equipamento (incluindo dispositivos), permitindo a simulação de processos de fabrico e a exibição de informações para visualização humana. Inclui sistemas inteligentes de protótipos físicos via Impressão 3D integrada no CPS, que interagem com o Design Assistido por Computador (CAD) e o Fabrico Assistido por Computador (CAM) [20].
<b>SMART MACHINE</b>	Máquina inteligente – integração de robôs e <i>Smart Machines</i> que podem interagir entre si e perceber o contexto de fabrico em que se encontram. A IoT e os <i>Smart Objects</i> integrados em máquinas ( <i>Smart Machines</i> ) capturam dados em tempo real enquanto os transferem para um sistema central baseado na <i>cloud</i> , a fim de fornecer soluções de fabrico inteligentes ( <i>Smart Manufacturing</i> ) e garantir uma auto-inspeção de qualidade [20].
<b>SMART PRODUCT</b>	Produto inteligente – produto físico equipado com sistemas, sensores e atuadores incorporados e que possui três elementos principais: Componentes físicos (peças mecânicas e elétricas / eletrónicas); Componentes inteligentes (sistemas de controlo, sensores, microprocessadores, de armazenamento de dados, de software e interfaces de utilizador); e Componentes de conectividade (portas, antenas e protocolos de interface com ou sem fios) [21].
<b>SMART MONITORING</b>	Monitorização inteligente – implementação de vários sensores, câmeras ou outros dispositivos de aquisição de dados, que fornecem informações em tempo real, que uma vez tratadas por <i>software</i> de tratamento de dados, podem ser apresentadas por meio de gráficos visuais ou como alertas quando algo inesperado acontece. Plataformas móveis, como tablets e smartphones, podem ser úteis para fornecer informações como procedimentos operacionais, informações técnicas e desenhos técnicos [20].
<b>SMART CONTROL</b>	Controlo inteligente – gerir fisicamente várias máquinas usando uma plataforma sediada e disponível na <i>cloud</i> . Por exemplo, um operador pode desligar uma máquina através de uma simples aplicação para o smartphone. As informações de <i>input</i> podem ser enviadas por um <i>touchscreen</i> sensível ao toque, por controlo de voz e reconhecimento de gestos em contextos industriais [22].
<b>SMART SCHEDULING</b>	Programação inteligente – implementação de modelos e algoritmos avançados para extrair informações dos dados capturados pelos sensores. Por conseguinte, os procedimentos de fabrico e o funcionamento da produção são executados de forma automática e eficaz [20].

Levando em consideração a introdução ao conceito de Indústria 4.0 e da importância do CPS, no subcapítulo seguinte são aprofundados os Princípios de Design da Indústria 4.0, para entender o conceito como um todo, a fim de aprofundar o conhecimento do CPS mediante todas as suas vertentes, que se relacionam com os diferentes Princípios de Design da Indústria 4.0.

#### 2.1.4. PRINCÍPIOS DE DESIGN DA INDÚSTRIA 4.0

Os Princípios de Design determinam uma sistematização do conhecimento e descrevem os constituintes elementares de um fenómeno [25], pelo que são uma boa forma de definir algo. Até 2015, não existia nenhuma literatura que providenciasse os Princípios de Design para o conceito de Indústria 4.0 [26]. Hermann *et al.* [27], em 2016, um ano após a publicação de um primeiro artigo abordando este tema, apresentaram um trabalho final em que reconheciam 4 Princípios de Design (interconexão, transparência de informações, decisões descentralizadas e assistência técnica) para a Indústria 4.0. Três dos quatro Princípios de Design escolhidos têm subcategorias, como pode ser visto na Figura 2.2 [13]. A pesquisa realizada por Hermann *et al.* [27] visou não só identificar os aspetos centrais da Indústria 4.0, como também chegar aos seus Princípios de Design. O processo que os autores seguiram consistiu em quatro etapas: identificação da literatura relevante; análise quantitativa de texto; revisão qualitativa da literatura e workshop em grupo. Assim, os Princípios de Design foram extraídos de uma aglomeração de 130 artigos, livros e publicações.



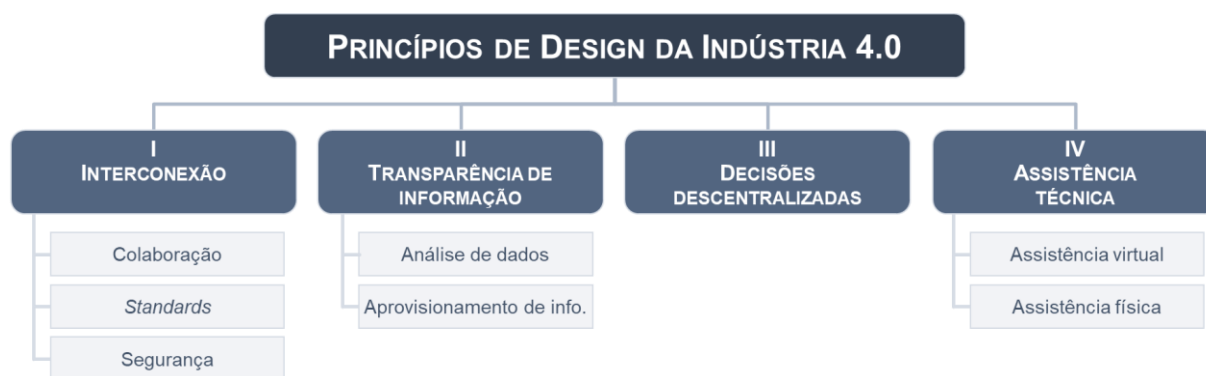


Figura 2.2 – Princípios de design da Indústria 4.0, adaptado de [27].

As definições de cada Princípio de Design propostas por Hermann *et al.* [27] reúnem citações de diferentes autores. A informação em cada definição foi organizada em tópicos, cujas descrições estão apresentadas abaixo na Tabela 2.2. Nota: não foram feitas alterações de conteúdo, exceto na definição complementar de *digital twin*.

Tabela 2.2 – Princípios de Design (P) da Indústria 4.0, adaptado de [27].

P	DESCRIÇÃO POR TÓPICOS
I INTERCONEXÃO	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Interações na IoT</b> – Máquinas, dispositivos, sensores e pessoas estão conectados pela IoT. As tecnologias de comunicação sem fios desempenham um papel de destaque na quantidade crescente de interações, pois permitem acesso à <i>Internet</i> em toda a parte.</li> <li>• <b>Colaboração na IoT</b> – Existem três tipos de colaboração na IoT: humano-a-humano (H2H), homem-a-máquina (H2M) e máquina-a-máquina (M2M).</li> <li>• <b>Partilha de informação</b> – Por meio da Internet de Tudo (IoE), objetos e pessoas interconectados são capazes de partilhar informações, o que forma a base de uma colaboração conjunta para alcançar objetivos comuns.</li> <li>• <b>Standardização e modularização</b> – A introdução de standards comuns de comunicação permite a combinação flexível de máquinas modulares de diferentes intervenientes.</li> <li>• <b>Adaptação flexível</b> – A modularização referida no ponto anterior permite que as <i>Smart Factories</i> se adaptem de maneira flexível às procura flutuantes de mercado ou a pedidos personalizados.</li> <li>• <b>Ciber-segurança</b> – À medida que o número de participantes da IoE cresce, os interesses monetários e políticos alavancam o número de ataques prejudiciais às instalações de produção da Indústria 4.0 e, consequentemente, aumentam a necessidade de ciber-segurança.</li> </ul>
II TRANSPARÊNCIA DE INFORMAÇÃO	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Fusão dos mundo físico e ciber</b> – ativada pelo número crescente de objetos e pessoas interconectados, a fusão dos mundos físico e virtual (ciber) permite uma nova forma de transparência de informações. Exemplos de informações do mundo virtual são os documentos e plantas digitais ou os modelos de simulação. Já do mundo físico tem-se a posição ou condições de uma ferramenta.</li> <li>• <b>Digital twin</b> – através da utilização de dados recolhidos por sensores conectados a modelos de plantas digitalizados, é criada uma cópia virtual do mundo físico (<i>digital twin</i>). O <i>digital twin</i> é a réplica digital de uma entidade física viva ou não viva; refere-se a uma réplica digital de ativos físicos potenciais e reais (<i>physical twin</i>), processos, pessoas, locais, sistemas e dispositivos que podem ser usados para vários propósitos [28].</li> <li>• <b>Sensibilidade ao contexto real</b> – informações sensíveis ao contexto real são indispensáveis para os participantes da IoE tomarem as decisões apropriadas. Os sistemas sensíveis ao contexto realizam as suas tarefas com base em informações provenientes dos mundos físico e virtual.</li> <li>• <b>Agregação e interpretação de dados brutos</b> – para analisar o mundo físico, os dados brutos (não tratados) recolhidos por sensores devem ser agregados às informações de contexto de maior valor e depois interpretados.</li> <li>• <b>Sistema de informação acessível</b> – para criar transparência, os resultados da análise de dados têm que ser incorporados em sistemas de assistência acessíveis a todos os participantes da IoE.</li> <li>• <b>Aprovisionamento de informação em tempo real</b> – para obtenção de informações críticas ao processo, o aprovisionamento de informações em tempo real é de extrema importância.</li> </ul>

P	DESCRIÇÃO POR TÓPICOS
III DECISÕES DESCENTRALIZADAS	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Base nos princípios I e II</b> – as decisões descentralizadas baseiam-se na interconexão entre objetos e pessoas, bem como na transparência das informações de dentro e de fora de uma instalação produtiva.</li> <li>• <b>Tratamento e utilização de informação local e global</b> – a combinação de tomadores de decisão interconectados e descentralizados permite utilizar informações locais e globais ao mesmo tempo para melhorar a tomada de decisões e aumentar a produtividade geral.</li> <li>• <b>Autonomia local</b> – os participantes da IoE realizam as suas tarefas da forma mais autónoma possível e estas são delegadas para um nível superior somente em caso de exceções, interferências ou de conflitos de objetivos.</li> <li>• <b>Papel do CPS</b> – do ponto de vista técnico, as decisões descentralizadas são possibilitadas pelo CPS. Os seus computadores, sensores e atuadores incorporados permitem monitorizar e controlar o mundo físico de forma autónoma.</li> </ul>
IV ASSISTÊNCIA TÉCNICA	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Papel do ser humano</b> – nas <i>Smart Factories</i> da Indústria 4.0, o papel principal dos seres humanos evolui de operador de máquinas para tomador de decisões estratégicas e solucionador de problemas.</li> <li>• <b>Sistemas de assistência aos operadores</b> – devido à crescente complexidade da produção, onde o CPS forma redes complexas e suporta a tomada de decisões descentralizadas, cresce também a necessidade de assistência aos operadores, através de sistemas destinados ao efeito.</li> <li>• <b>Visualização abrangente e otimizada de informação</b> – os sistemas de assistência devem agregar e visualizar informações de maneira abrangente e visualmente otimizada para garantir que se possa tomar decisões informadas e resolver problemas urgentes rapidamente.</li> <li>• <b>Smart devices</b> – atualmente, <i>smartphones</i> e <i>tablets</i> desempenham um papel central quando se trata de conectar pessoas à IoT. Prevê-se que os <i>wearables</i> (Dispositivos Eletrônicos Inteligentes, ou <i>Smart e-Devices</i>, que podem ser incorporados no vestuário ou no corpo para servirem como acessórios) se tornem cada vez mais importantes no futuro assim que os obstáculos atuais, como o fornecimento de energia e o custo elevado destes produtos, forem superados.</li> <li>• <b>Assistência robótica</b> – o apoio físico oferecido pela robótica aos operadores é considerado como outro aspeto importante da assistência técnica, já que os robôs são capazes de realizar uma série de tarefas desagradáveis, cansativas ou até inseguras para pessoas.</li> <li>• <b>Interação M2H</b> – para um suporte eficaz, bem-sucedido e seguro dos operadores em tarefas físicas, é necessário que os robôs interajam de maneira suave e intuitiva com os operadores e que estes sejam instruídos devidamente para a colaboração M2H em causa.</li> </ul>

O leitor pode notar, mais uma vez, o papel basilar do CPS na Indústria 4.0 ao ser mencionado diretamente no terceiro e quarto princípios. Além disso, o CPS é referido indiretamente através de muitos outros conceitos inerentes aos quatro princípios que o CPS também pode incluir (se necessário). Esses conceitos são aprofundados mais à frente nesta dissertação, onde o CPS é o tópico principal (subcapítulo 2.2). Em suma, estes Princípios de Design permitem um entendimento comum da Indústria 4.0, o que é necessário para uma discussão científica razoável sobre o tópico [27], especialmente quando se pretende entender os Conceitos Tecnológicos (abordados no subcapítulo 2.1.5) da Indústria 4.0. A partir deste ponto, quando o termo Indústria 4.0 for usado nesta dissertação, estes quatro Princípios de Design devem ser sempre levados em consideração [13].

### 2.1.5. CONCEITOS TECNOLÓGICOS DA INDÚSTRIA 4.0

O conceito de Indústria 4.0 está profundamente relacionado com a implementação da tecnologia no fabrico e nos negócios gerais das empresas [16]. Além da transformação dos modelos de negócios, a Indústria 4.0 também influenciará a evolução das tecnologias [14]. Amaral [13], na sua dissertação, pôde concluir que existem muitos tipos diferentes de tecnologias que podem ser introduzidas no dia-a-dia de uma empresa, para permitir que esta evolua em direção à Indústria 4.0. Esses tipos de tecnologias têm muitos nomes e definições e em 2018 Bibby *et al.* [29] elaboraram um resumo dos principais

Tabela 2.3 – Conceitos Tecnológicos da Indústria 4.0, adaptado de [16], [29], [30].

CONCEITO	DESCRIÇÃO E CARACTERÍSTICAS
<b>BIG DATA</b>	A disponibilidade e a interrogação de dados são recursos essenciais da Indústria 4.0. Com os avanços da tecnologia, a prontidão dos dados é comum; no entanto, a recolha, análise e apresentação desses dados são raras nas organizações. O uso de dados permite a capacidade de planejar, controlar e responder efetivamente aos processos, sistemas e <i>networks</i> de produção [29].
<b>SISTEMA DE EXECUÇÃO DE MANUFATURA (MES)</b>	Um MES fornece recursos de gestão de dados e uma interface de usuário comum para operadores. É uma ferramenta útil para organizações que exigem uma rastreabilidade precisa de peças de componentes e atividades de montagem para monitorizar a qualidade, custo e <i>lead time</i> <sup>1</sup> . Um MES também fornece uma distribuição central da função de informação [29].
<b>SENSORES</b>	O uso de <i>Smart Sensors</i> na organização de fabrico permite a geração de dados importantes e úteis, que podem ser recuperados, monitorizados e relatados ao usuário. Os sensores também fornecem a plataforma para digitalizar "coisas" para dar suporte ao conceito de IoT. Um sensor frequentemente usado é o sensor RFID, usado para recolher e transmitir dados de volta para uma plataforma comum como a <i>cloud</i> de manufatura [29].
<b>CLOUD</b>	<i>Cloud</i> é o termo que se refere ao aplicativo baseado na <i>web</i> cujas informações são armazenadas em servidores externos. É representado por três combinações de IT: Serviço de Internet, Aplicativo de Web e Gestão de Informações. O fabrico em <i>Cloud</i> está especificamente relacionado com o conceito de Indústria 4.0. Atua na espinha dorsal para apoiar a IoT, o CPS, o MES e a conectividade de sensores. Os conceitos de fabrico em <i>Cloud</i> criam uma plataforma central que permite o acesso comum a dados de toda a eVC para permitir ganhos de eficiência em flexibilidade [29].
<b>FABRICO ADITIVO</b>	Fabrico aditivo (impressão 3D) é um processo através do qual os produtos são produzidos autonomamente, camada por camada. É uma tecnologia essencial para permitir a personalização em massa através da capacidade de produzir rapidamente peças à medida, além da capacidade de evitar a compra de novos equipamentos dispendiosos, mas necessários para a introdução de novos produtos. Esta tecnologia é especialmente usada para prototipagem rápida e criação de ferramentas personalizadas sob medida [29].
<b>CADEIA DE VALOR ELETRÔNICA (EVC)</b>	Uma vez suportada pela digitalização, a eVC permite a conectividade, colaboração e cooperação contínuas entre fornecedor e cliente. Reduz os prazos de entrega, os custos de stock, a experiência do cliente e performance do fornecedor, integrando dados de toda a VC. A conectividade em toda a VC oferece oportunidades de transparência que possibilitam um contexto real ativo, que permite o apoio às atividades por parte do cliente e do fornecedor [29].
<b>ROBÔS AUTÓNOMOS</b>	O uso de robôs autónomos ou inteligentes aumenta a produtividade, a qualidade do produto e a redução dos custos unitários de produção. Em alguns casos, oferecem melhores soluções que a mão-de-obra humana mais qualificada. Este conceito também suporta o objetivo da Indústria 4.0 de Customização em Massa <sup>2</sup> . Os avanços na robótica permitem que os sistemas imitem as ações dos seres humanos, trabalhem de forma autónoma, tenham consciência do contexto real e se adaptem a cenários inesperados [29].
<b>IoT</b>	A IoT é a extensão da Internet atual que providencia aos objetos ligação à Internet (quaisquer que sejam, mas com capacidade computacional e de comunicação). A conexão com a rede mundial de computadores viabilizará, primeiro, controlar remotamente os objetos e, segundo, permitir que os próprios objetos sejam utilizados como provedores de serviços. Estas novas capacidades dos objetos comuns geram um grande número de oportunidades no âmbito industrial [30].
<b>CPS</b>	O CPS inclui sistemas incorporados, processos de produção, de logística, de engenharia, de coordenação e de gestão, bem como serviços de Internet que recolhem diretamente dados físicos com sensores. Usando atuadores, influenciam processos físicos. São conectados entre si por redes digitais, usam dados e serviços disponíveis mundialmente e possuem interfaces H2M multimodais. Os CPS são sistemas abertos sócio-técnicos e permitem várias funções, serviços e características inovadoras [16].

<sup>1</sup> O *lead time* é o período de latência entre o início e a conclusão de um processo [89].

<sup>2</sup> A Customização em Massa refere-se à capacidade de oferecer produtos personalizados em larga escala, de forma ágil e flexível, para que cada cliente possa encontrar os produtos que atendam às suas necessidades específicas, a um preço adequado, e no tempo certo [90].

Conceitos Tecnológicos da Indústria 4.0, categorizando-os em oito grupos diferentes. O resultado desta investigação foi utilizado na presente dissertação, mas desta vez categorizaram-se os Conceitos Tecnológicos em nove grupos diferentes, descritos na Tabela 2.3. Isto porque só sete das descrições dos oito grupos definidos por Bibby *et al.* [29] parecem estar de acordo com a literatura e, segundo Amaral [13], o grupo de Conceitos Tecnológicos de “IoT e CPS” deve ser dividido em duas categorias diferentes. David Siepmann refere-se ao CPS como o Conceito Tecnológico básico para a implementação da Indústria 4.0, e à IoT como um componente básico associado a essa tecnologia [31]. Lele A., no seu livro publicado em 2019 [32], considera a IoT como um dos “recursos essenciais” da Indústria 4.0, considerando o CPS apenas como sistemas (tecnologia). Por sua vez, Hermann *et al.* em 2016 consideraram a IoT e o CPS como dois componentes diferentes [27]. Na Figura 2.1 observa-se que a IoT possibilita a existência do CPS e, por sua vez, o CPS é um componente essencial da *Smart Manufacturing*. As descrições e características das nove categorias de Conceitos Tecnológicos são, então, apresentadas na Tabela 2.3.

Assim, pode-se então concluir novamente que o CPS é essencial na Indústria 4.0, sendo um dos seus Conceitos Tecnológicos. Partindo da definição de CPS proposta por Kagermann *et al.* [16] apresentada na Tabela 2.3, o subcapítulo seguinte aborda o conceito através de uma análise mais extensa. Depois, no subcapítulo 2.2.2, a sistematização de componentes e funcionalidades do CPS é elaborada, e uma maior compreensão do CPS poder ser obtida.

## 2.2. SISTEMAS CIBER-FÍSICOS

Muitos autores destacam a importância dos CPS nas economias e sociedades atuais por ser uma tecnologia que irá transformar muitos aspetos da vida. Um estudo de 2012 [33] estimou que as inovações técnicas da “Internet Industrial” (i.e. “casamento entre máquinas e análises”, que remete para o CPS e outros Conceitos Tecnológicos) possam encontrar aplicações diretas em setores que atualmente representam mais de 32,3 biliões de dólares americanos em atividades económicas e com potencial para aumentar para 82 biliões em 2025, aproximadamente metade da economia global [34]. Tal facto não é de estranhar, uma vez que o CPS é cada vez mais procurado para providenciar novas funcionalidades e valor a produtos, sistemas e infraestrutura em setores como o transporte (aviação, rodoviário, ferroviário e marítimo), saúde, manufatura e energia [5]–[7]. Algumas universidades até já criaram cursos dedicados exclusivamente à Engenharia de CPS, como é o caso da Northeastern University de São Francisco, Califórnia que tem oferece um MSc em CPS [35] ou a Technische Universität de Dortmund que iniciou um curso superior intitulado “Fundamentos do CPS” [36]. Assim, a Engenharia de CPS é uma disciplina que já é e certamente será cada vez mais importante no mundo académico.

É ao vincular processos físicos ao mundo virtual, onde as capacidades de análise e processamento de informação possibilitam a existência de novas soluções e serviços em muito superiores aos serviços tradicionais isolados, que os CPS entram em jogo como uma tecnologia de amplo impacto [4]. Essas capacidades incluem níveis de eficiência, flexibilidade, autonomia e fiabilidade nunca antes vistos e em muito superiores aos sistemas tradicionais fracamente acoplados ou incorporados, operados manualmente. No entanto, assim como foi referido no primeiro Princípio de Design da Indústria 4.0, o CPS também pode provocar vulnerabilidade, criando novos problemas de segurança e fiabilidade [2], [4], [6], [37]–[39].

Depois da análise do primeiro parágrafo, é natural afirmar que a ciência e tecnologia dos CPS

abrangem muitas áreas, e entre elas encontra-se a manufatura. Sendo esta dissertação de Engenharia Mecânica de Produção, a aplicação na *Smart Manufacturing* é a única área relevante por agora. De acordo com Thiede *et al.* [40], em sistemas de produção a implementação de elementos da tecnologia de CPS leva a Sistemas de Produção Ciber-Físicos (CPPS). No capítulo 4 é apresentada uma proposta de metodologia de CPSDD genérica, onde é feita uma aplicação prática a um negócio que envolve vários contextos, entre os quais o contexto produtivo. Apesar de o foco principal do CPSDD estar no CPS do sistema produtivo, onde faria sentido usar o termo CPPS, neste capítulo (assim como em toda a dissertação) é sempre usado o termo inerente ao acrónimo “CPS”. Usa-se sempre o termo genérico porque, apesar de o foco estar na atividade de produção, as restantes atividades da VC também são importantes, e o termo “CPS” melhor remete para todas elas.

## **2.2.1. CONCEITO DE CPS**

### **2.2.1.1. ORIGEM DO CONCEITO DE CPS**

A designação de CPS pode ser rastreada até 2006, quando foi cunhada por Helen Gill durante o primeiro *Workshop* da *National Science Foundation* sobre o tema, realizado em Austin, Texas [41], [42]. O anúncio a seguir pode ser lido na página da conferência: “*A iniciativa de investigação em CPS busca novas bases e tecnologias científicas para permitir o desenvolvimento e a integração rápida e confiável de sistemas físicos e de engenharia centrados em computadores e informações. O objetivo da iniciativa é inaugurar uma nova geração de sistemas de engenharia altamente confiáveis, produzidos com eficiência e capazes de um desempenho avançado em informações, computação, comunicação e controlo*” [43]. Vários acontecimentos subsequentes como *workshops*, publicação de relatórios oficiais do governo americano e até o destaque do CPS como prioridade nacional americana de Investigação e Desenvolvimento, levaram a um crescimento constante da investigação sobre CPS nos EUA [44]. A generalidade das publicações recentes sobre CPS atribui o cunhar do termo “sistema ciber físico” a Helen Gill, mas também apontam para a origem que teve em conceitos anteriores, como a mecatrónica, os sistemas incorporados, a computação difundida, o ciber, entre outros. No entanto, o CPS foi definido formalmente pela primeira vez por Lee [37] em 2008 como “*integrações de computação, networking e processos físicos. Computadores e redes incorporados monitorizam e controlam os processos físicos, geralmente com loops de feedback nos quais os processos físicos afetam os cálculos e vice-versa*”. Esta definição provou ser notável ao ser mais tarde citada por outros autores, como Al-Ali *et al.* [3].

No seu artigo sobre o passado, o presente e o futuro dos CPS, em 2015, Edward A. Lee [45] investigou a origem do termo “Ciber” para entender aprofundadamente o seu significado. No seu trabalho pôde concluir que o termo relacionado com ciber, “Ciberespaço”, é atribuído a William Gibson, que foi o primeiro a usa-lo no seu romance “*Neuromancer*” [46]. Porém, as raízes do termo CPS são mais antigas e profundas. Seria mais rigoroso visualizar os termos “Ciberespaço” e CPS como decorrentes da mesma raiz, “Cibernética” (*Cybernetics* em inglês), palavra cunhada por Norbert Wiener [47], um matemático americano que teve um enorme impacto no desenvolvimento da teoria dos Sistemas de Controlo (CS). Na Segunda Guerra Mundial, Wiener foi pioneiro na tecnologia para apontar e disparar automaticamente armas antiaéreas. Embora os mecanismos que ele usou não envolvessem computadores digitais, os princípios envolvidos eram semelhantes aos usados atualmente em sistemas de controlo de *feedback* baseados em computador. A sua lógica de controlo era efetivamente uma computação, ainda que executada com circuitos analógicos e partes mecânicas. Assim, a cibernética é a

conjunção de processos físicos, computação e comunicação. Wiener derivou o termo do grego κυβερνήτης (kybernetes), que significa timoneiro, governador, piloto ou leme, elaborando uma metáfora adequada para os sistemas de controlo [45]. Por vezes, o termo CPS é confundido com "ciber-segurança", que diz respeito à confidencialidade, integridade e disponibilidade de dados e não possui conexão intrínseca com processos físicos. O termo "ciber-segurança" designa então a segurança do ciber-espaço, logo é apenas indiretamente conectado ao ciber. É claro que o CPS envolve muitas preocupações desafiadoras de segurança e privacidade, mas essas não são de forma alguma as únicas preocupações [45].

Os CPS não são os sistemas incorporados tradicionais, ou as redes de sensores atuais, ou apenas aplicações de *software* [6]. Mais recentemente, em 2018, Al-Ali *et al.* [3] escreveram que os CPS são a versão atualizada dos sistemas incorporados. Mas o que é um sistema incorporado? O Livro "Design de Sistemas Incorporados" [48] explica bem: "*Um sistema incorporado é um sistema baseado em microprocessadores, criado para controlar uma função ou um conjunto de funções. Não foi projetado para ser programado pelo usuário final da mesma maneira que um computador.*" Ao utilizar um Sistema Incorporado, o usuário pode fazer escolhas relacionadas com a funcionalidade, mas não pode alterar a funcionalidade do sistema adicionando/substituindo *software*. Com um computador, é exatamente isso que um usuário pode fazer: num instante o computador é um processador de texto e no outro é uma máquina de jogos, simplesmente alterando o *software*. Um sistema incorporado é projetado para executar uma tarefa específica, embora com escolhas e opções diferentes [48]. Assim, as tecnologias de computação que permitem a transformação dos sistemas incorporados são o Sistema em Chip (SoC), a IoT e as Plataformas de Computação em *Cloud* (CCP). Ao nível das linhas de produção, sensores, atuadores e SoC equipados com WiFi e/ou *Ethernet* (arquitetura de interconexão para redes locais) são integrados para transformar os sistemas incorporados existentes em CPS [49].

### **2.2.1.2. DEFINIÇÃO DO CONCEITO DE CPS**

Em 2016, Monostori *et al.* [42] publicou um documento intitulado "CPS em Manufatura" após uma grande investigação cujos objetivos seguiam duas vertentes: (1) identificar artigos potencialmente impactantes relacionados com o CPS e (2) descobrir como evoluiu o CPS em relação a problemas, aplicações e técnicas. Após investigar 1982 trabalhos, os autores chegaram a uma definição final: "*Os CPS são sistemas de entidades computacionais colaborativas que estão em intensa conexão com o mundo físico circundante e os seus processos em andamento, fornecendo e utilizando, ao mesmo tempo, serviços de acesso a dados e processamento de dados disponíveis na Internet*". Rajkumar *et al.* [7] definem o CPS por outras palavras, desta vez dando mais foco à engenharia de sistemas físicos: "*Os CPS são sistemas físicos e de engenharia cujas operações são monitorizadas, controladas, coordenadas e integradas por um núcleo de computação e comunicação*". Finalmente, Lee e Seshia [41] declaram que a interação entre os elementos físico e ciber é de importância fundamental: "*O CPS é sobre a interseção, não a união, do físico e do ciber. Não chega entender separadamente os componentes físicos e os componentes computacionais. Deve-se compreender a sua interação*". Recentemente, em março de 2019, Burns *et al.* [44] publicaram um artigo onde concluem que as tendências das publicações sobre CPS revelam um "padrão de expansão constante". Após a revisão de 31 definições publicadas, reparou que estas revelam terminologias comuns de origem derivada da Ciência da Computação e da Engenharia de Sistemas. Além disso, considera-as como amplamente consistentes ao longo do tempo ao destacarem sempre um conjunto de 6 tópicos comuns do CPS. Resumidamente,

tem-se que [44],[37]: (1) Sistemas físicos, lógicos e híbridos – O CPS é composto por sistemas que são híbridos de elementos físicos e lógicos; (2) Métodos híbridos, de análise e medição – O CPS requer abordagens híbridas que unam métodos discretos e contínuos para sistemas físicos e lógicos integrados; (3) Controlo – O CPS desempenha o controlo de processos físicos e sistemas de engenharia através de sistemas computacionais; (4) Classes de Componentes – Os Componentes não humanos do CPS categorizam-se em três classes: (i) Componentes físicos ou engenhos, (ii) transdutores (sensores e atuadores) e (iii) sistemas de tecnologia da informação (TI), incluindo sistemas de rede/sistemas de comunicação e sistemas de computação/análise/controlo. Os seres humanos também são Componentes em interação; (5) Tempo – O CPS depende da integração do tempo do contexto físico com a computação orientada a eventos; (6) Fiabilidade – O CPS requer fiabilidade, segurança e proteção, no contexto real de envolvimento de processos físicos e sistemas de engenharia.

Evidentemente, existem várias definições sobre o conceito de CPS, mas todas convergem para os aspetos essenciais apresentados na Tabela 2.4.

Tabela 2.4 – Aspetos essenciais do conceito de CPS, baseados nos parágrafos anteriores.

ASPETOS ESSENCIAIS DO CONCEITO	
<b>SISTEMA CIBER-FÍSICO</b>	<p>Um sistema ciber-físico:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Opera em contextos físicos e de engenharia;</li> <li>• É formado por sistemas heterogéneos distribuídos;</li> <li>• Regista dados físicos usando sensores;</li> <li>• Guarda, processa e avalia dados;</li> <li>• Utiliza dados disponíveis globalmente;</li> <li>• É formado por sistemas conectados entre si e em redes globais;</li> <li>• Envolve tecnologias de informação, comunicação e controlo (ICCT);</li> <li>• Afeta processos físicos através de atuadores;</li> <li>• Tem uma série de interfaces homem-máquina multimodais dedicadas;</li> <li>• É de estrutura e funcionalidades programáveis;</li> <li>• Possibilita a interseção do contexto físico com o contexto ciber;</li> <li>• Baseia-se na integração do tempo do contexto físico com a computação orientada a eventos;</li> <li>• É uma orquestração de ICCT e sistemas físicos de engenharia;</li> <li>• Requer fiabilidade, segurança e proteção.</li> </ul>

A definição final sistemática apresentada na Tabela 2.4, cujas subdefinições foram baseadas em mais de 20 documentos diferentes, será pedra basilar no prosseguir desta dissertação. Seguidamente, nas próximas três secções, são apresentados os resultados de uma investigação mais profunda sobre os componentes, funcionalidades e requisitos do CPS.

### 2.2.2. COMPONENTES, FUNCIONALIDADES E REQUISITOS DE CPS

Relativamente à sistematização e conceptualização dos componentes e das funcionalidades do CPS, existem na literatura diversas abordagens, sendo que muitos autores utilizam o termo “arquitetura” como La e Kim [50], Lee *et al.* [51], Jiang [52] e Ahmadi *et al.* [21]. Estes trabalhos corroboram o postulado de Thalheim [53], de que “a arquitetura de um sistema é o modelo conceptual que define a sua estrutura e o seu funcionamento, ao mesmo tempo que permite visualizar o sistema de todas as perspetivas possíveis”. Segundo Medvidovic e Taylor [54], a arquitetura de um sistema pode consistir em componentes e em subsistemas, que trabalham juntos para a funcionalidade geral do sistema. Além disso, a arquitetura de um sistema define a sua organização fundamental, incorporada nos componentes do sistema, as relações entre componentes e desses componentes com o contexto real. Neste

sentido, nos parágrafos seguintes são apresentadas as seis Arquiteturas de CPS identificadas na Literatura e classificadas como essenciais e complementares para o desenvolvimento de CPS, uma vez que juntas oferecem informação suficiente para uma descrição completa dos seus componentes e das suas funcionalidades. Os autores perseguiram o objetivo de descrever totalmente o CPS, e abordaram todos os pontos que identificaram como essenciais. Logo, era de esperar que as arquiteturas apresentassem pontos em comum, ainda para mais quando os autores baseiam o seu trabalho em publicações anteriores. Assim, a Tabela 2.10 foi elaborada não contendo toda a informação que os autores providenciaram nos respetivos artigos, porque se concluiu que alguma dessa informação já estava incluída em tabelas anteriores (Tabela 2.8 e Tabela 2.9).

Em 2010, La e Kim [50] propuseram a “Arquitetura de CPS baseado em serviços”. Ao defini-la, consideraram as seguintes observações e suposições sobre o CPS: os dispositivos físicos são conectados através da rede ao sistema de controlo que executa computações essenciais; a funcionalidade do software não está fortemente acoplada aos elementos de hardware; e o CPS requer processamento em tempo real e *on-demand*. Com base nesta tríade de princípios, os autores definiram a arquitetura do CPS baseado em serviços, ilustrada na Figura 2.3.

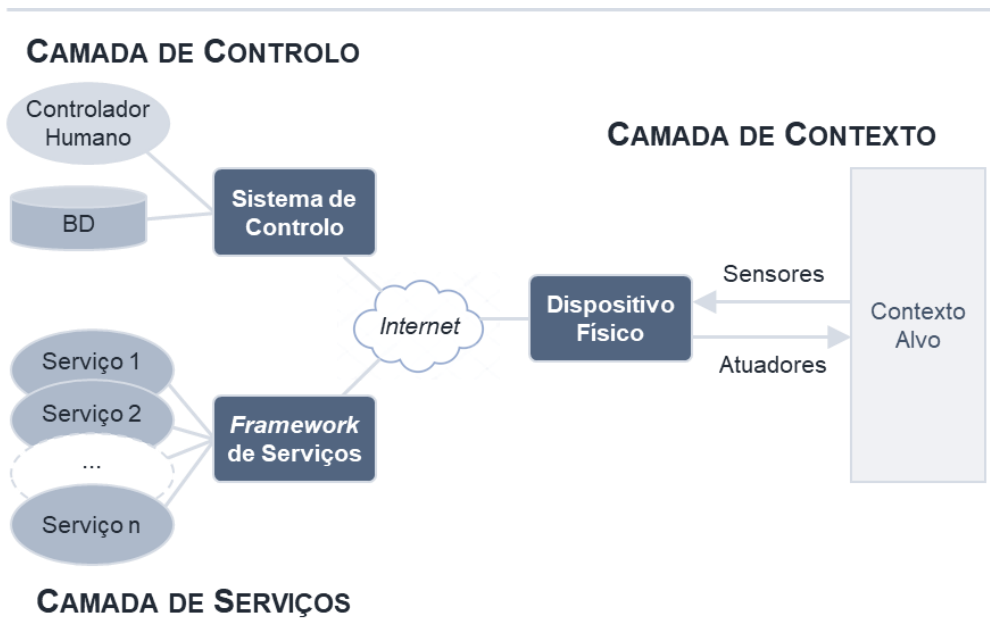


Figura 2.3 – Arquitetura do CPS baseado em serviços [50].

As três camadas de contexto, controlo e serviços estão descritas na Tabela 2.5.

Tabela 2.5 – Descrição das 3 camadas Arquitetura do CPS baseado em serviços [50].

CAMADA	DESCRIÇÃO
CONTEXTO	Consiste em dispositivos físicos (normalmente incorporados) e um contexto real alvo que inclui utilizadores finais que interagem com os dispositivos e o contexto físico associado
SERVIÇOS	É um meio de computação típico com serviços em Arquitetura Baseada em Serviços (SOA) e <i>Cloud Computing</i> . Vários serviços são implantados nos Repositórios de Serviços e uma <i>Framework</i> de Serviços gere-os e possibilita as interações com os utilizadores.
CONTROLO	Tem a função de receber dados monitorizados captados por meio de sensores, tomar decisões de controlo, encontrar o serviço certo para cada ocasião, ao consultar a <i>Framework</i> de Serviços e permitir que os serviços sejam solicitados no Dispositivo Físico.

Em 2012 Hu *et al.* [55] estudou a arquitetura anterior, das três camadas, e propôs uma nova abordagem, agora com cinco, baseada na SOA. As camadas propostas estão descritas na Tabela 2.6. Os autores concluíram que a arquitetura desenvolvida é simples e leva em consideração a flexibilidade



de integração de serviços e componentes.

Tabela 2.6 – Descrição das 5 camadas da Arquitetura do CPS baseada em SOA [55].

CAMADA	DESCRIÇÃO
PERCEÇÃO	Consiste na fonte de dados e na conscientização do contexto físico real, alcançada por sensores e pré-processamento de dados preliminares.
DADOS	Consiste nos dispositivos computacionais e de armazenamento, que fornecem uma normalização de dados heterogêneos, assim como reduções de ruído.
SERVIÇOS	Inclui tomadas de decisão, análise e agendamento de tarefas que interagem entre si.
EXECUÇÃO	Consiste no atuador que executa o comando recebido do sistema.
GARANTIA DE SEGURANÇA	Envolve todo o sistema, consistindo em segurança de acesso, segurança de dados e segurança de dispositivos.

Outro trabalho consultado foi o publicado por Jiang em 2017 [52], que faz referência à arquitetura ISA-95 (ver Tabela 2.7). Este modelo foi aprovado pela ISA (International Society of Automation) para fins de integração de sistemas de controlo corporativo [56].

Tabela 2.7 – Descrição dos níveis da Arquitetura ISA-95, adaptado de [56].

NÍVEL	DESCRIÇÃO
DEFINIÇÃO DO CONTEXTO	Definição dos processos físicos reais.
PERCEÇÃO E MANIPULAÇÃO	Percecionar e manipular a realidade através de sensores e atuadores.
CONTROLO DE FABRICO	Monitorizar, efetuar o controlo de supervisão e o controlo automatizado do processo de produção. Os componentes presentes neste nível são o SCADA, DCS e PLC.
GESTÃO DE OPERAÇÕES	Lidar com o fluxo de trabalho e com as atividades para produzir os produtos desejados. As entidades possíveis nesse nível são os MES, PIMS, WMS e CMMS.
PLANO ADMINISTRATIVO	Trabalhar com o planeamento de negócios, logística, programação da produção, gestão operacional, gestão de atividades comerciais e desenvolvimento de produtos. Os componentes existentes neste nível são sistemas ERP, PLM, HRM, CRM e SCM.

Em 2015, Lee et. al. [51] propuseram a arquitetura 5C para construir o CPS de uma *Smart Factory*. A arquitetura 5C define, através da forma sequencial do fluxo de trabalho, como construir um CPS desde a aquisição inicial de dados, à análise e criação final de valor. Consiste em 5 níveis: de baixo para cima, Conexão inteligente, Conversão de dados para informação, Ciber, Cognição e Configuração. Observando apenas os níveis de I a V da Figura 2.4, o leitor poderá encontrar um sumário ilustrativo da arquitetura 5C. Os 5C formam os 5 níveis da pirâmide, cujas medidas de ação estão detalhadas na Tabela 2.8.

Tabela 2.8 – Medidas de ação dos níveis da arquitetura de 5C, adaptado de [51].

NÍVEL	MEDIDAS DE DESENVOLVIMENTO
I CONEXÃO	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Adquirir dados precisos e confiáveis das máquinas e dos seus componentes;</li> <li>2. Obter dados diretamente através de sensores ou de sistemas de fabrico ou controladores, como o ERP, MES, SCM e CMM;</li> <li>3. Considerar dois fatores: (i) Implementar um método ininterrupto, integrado, que considere vários tipos de dados, para gerir o procedimento de aquisição de dados e a transferência dos mesmos para o servidor central, onde protocolos específicos, e.g. o MTConnect [57], são extremamente úteis; (ii) Selecionar os sensores adequados (tipo e especificação).</li> </ol>
II CONVERSÃO	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Deduzir e concluir algumas informações significativas a partir de dados brutos;</li> <li>2. Utilizar as várias ferramentas e metodologias, como algoritmos específicos para a gestão PHM;</li> <li>3. Providenciar autoconsciencialização às máquinas.</li> </ol>

NÍVEL	MEDIDAS DE DESENVOLVIMENTO
III CIBER	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Criar um centro de informações para o sistema, baseado em SOA e plataformas virtuais protegidas baseadas e integradas na <i>Cloud</i>, para armazenar dados de processamento colaborativo de forma segura e confiável.</li> <li>2. Formar uma rede de máquinas conectadas que enviam as suas informações para o centro;</li> <li>3. Efetuar uma recolha massiva de informações;</li> <li>4. Extrair informações adicionais através de análises específicas, que proporcionam uma melhor percepção do <i>status</i> de máquinas individuais ao longo do processo;</li> <li>5. Providenciar às máquinas, através das análises específicas, a capacidade de autocomparação, onde o desempenho de uma máquina pode ser comparado e classificado com os desempenhos das outras máquinas do processo;</li> <li>6. Avaliar as semelhanças do desempenho das diferentes máquinas;</li> <li>7. Criar um historial de informação em constante atualização;</li> <li>8. Prever o comportamento futuro das máquinas e por conseguinte, do processo.</li> </ol>
IV COGNICÃO	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Gerar um conhecimento completo do sistema monitorizado;</li> <li>2. Estruturar, organizar e apresentar a informação comparativa dos vários componentes do processo e do <i>status</i> individual de cada componente;</li> <li>3. Otimizar a informação através de ferramentas e <i>software</i> de tratamento visual, como grafismos e <i>dashboards</i>;</li> <li>4. Suportar a tomada de decisão dos especialistas e a priorização das tarefas a fim de otimizar o processo de manutenção.</li> </ol>
V CONFIGURAÇÃO	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Aplicar o feedback do ciberespaço no contexto real físico;</li> <li>2. Atuar através do controlo de supervisão;</li> <li>3. Tornar as máquinas auto-configuráveis e auto-adaptáveis;</li> <li>4. Atuar como um Sistema de Controlo Resiliente (RCS) para aplicar as decisões corretivas e preventivas, que foram transmitidas do nível de cognição para o sistema monitorizado.</li> </ol>

Em 2017, Jiang [52] apresentou uma reformulação da arquitetura proposta por Lee *et al.* [51]. No seu artigo [52], Jiang faz referência à arquitetura 5C e analisa-a escrevendo que esta é adequada para Produção em Massa mas não para Customização em Massa. A arquitetura 5C, escreve Jiang, concentra-se mais na Integração Vertical e menos na Integração Horizontal (ver definições no subcapítulo 2.1.2) e não realça todos os serviços do ciclo de vida do produto, que são recursos essenciais para ativar a Customização em Massa. Além disso, refere-se principalmente às *Smart Machines*, não dando foco aos prestadores de serviços industriais, fornecedores e clientes que também estão ligados à Internet [58]. Para resolver esse problema, Jiang propôs uma reformulação da arquitetura 5C, adicionando 3 vertentes C: Coalizão, Cliente e Conteúdo (para fins de harmonização da escrita, nesta dissertação utilizar-se-á também aqui a designação “nível”), cujas medidas de ação estão na Tabela 2.9. Adaptando a ilustração esquemática que os autores propuseram, na Figura 2.4 é exposta a Arquitetura 8C, onde se adicionou o nível zero “Contexto”, sugerido nas abordagens [50], [56]. A estrutura piramidal revestida realça uma lógica de dependência. A Configuração (V) depende dos desenvolvimentos dos níveis abaixo (I, II, III e IV) e as três vertentes nos três lados dependem



Figura 2.4 – Arquitetura de CPS de 8C, adaptado de [52].

dos 5C iniciais. Por outras palavras, é impossível construir um CPS com capacidades de Coalizão (VI) sem ter os requisitos necessários de Cognição (IV), ou qualquer outro nível abaixo. Porém, existem exceções. Por exemplo: não significa que, para o CPS usufruir de capacidades de inserção do Cliente (VIII) na VC, se tenha que investir em robôs auto-configuráveis (nível V).

Tabela 2.9 – Medidas de ação dos níveis 3C, adaptado de [52].

NÍVEL	MEDIDAS DE DESENVOLVIMENTO
VI COALIZÃO	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Integrar a VC e a cadeia de produção nas diferentes partes do processo de produção;</li> <li>2. Construir a cadeia de fornecimento através da colaboração das diferentes partes;</li> <li>3. Programar as linhas de produção para formar a cadeia de produção, a fim de produzir produtos específicos de maneira flexível e oportuna;</li> <li>4. Reconstruir, de forma dinâmica e oportuna, as cadeias de fornecimento e de produção através da colaboração das diferentes partes, caso haja algum ajuste no processo de produção.</li> </ol>
VII CONTEÚDO	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Concentrar na extração, armazenamento e consulta do registo de rastreabilidade do produto;</li> <li>2. Extrair e armazenar adequadamente todas as informações da VC, como fornecedores ou fontes de matéria-prima (m-p), processos de produção, fenómenos do ambiente de produção (por exemplo, temperatura, humidade, vibração), parâmetros de produção, armazéns e logística de embarque e envio;</li> <li>3. Armazenar as informações de forma adequada em registos de rastreabilidade do produto para consultas futuras;</li> <li>4. Incluir no registo conteúdo importante como: detalhes do serviço pós-venda, orientações para a manutenção, substituição de peças, instruções de operação, solução de problemas e reciclagem;</li> <li>5. Atualizar o registo com informação personalizada do cliente como reclamações, sugestões e comentários, na forma de texto, áudio ou até vídeo;</li> <li>6. Alcançar todo o serviço do ciclo de vida do produto;</li> <li>7. Aprimorar o processo de fabrico, o design da produção e o atendimento ao cliente;</li> <li>8. Prever o mercado de produtos.</li> </ol>
VIII CLIENTE	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Focar no papel que os clientes desempenham no processo de design, produção e serviço pós-venda do produto;</li> <li>2. Ter a capacidade de satisfazer vários pedidos de pequenas quantidades, de múltiplos clientes e de forma flexível no prazo estabelecido;</li> <li>3. Possibilitar a participação dos clientes, distribuidores e compradores no design do produto, no acompanhamento do processo de produção e inclusive na modificação das especificações do produto durante o processo (este ponto depende do seguinte);</li> <li>4. Implementar o conceito de fabrico centrado no produto, que consiste na capacidade de a fábrica responder espontaneamente a um pedido, preparando automaticamente os materiais, agendando os processos de produção de forma célere e flexível, reconfigurando dinamicamente as linhas de produção e organizando automaticamente o armazenamento e a entrega do produto;</li> <li>5. Notificar os clientes sobre o progresso da produção através de emails ou mensagens de texto;</li> <li>6. Mudar o paradigma da produção em massa para a personalização em massa, ou seja, produzir uma grande variedade de produtos com especificações diferentes, em vez de grandes séries de produtos iguais;</li> <li>7. Providenciar serviços pós-venda sobre a utilização, manutenção e até reciclagem do produto para melhorar a qualidade da experiência do consumidor.</li> </ol>

Estes níveis 3C realçam a Integração Horizontal do CPS, através da integração (ou VI – Coalizão) dos diferentes intervenientes da VC e ciclo de vida do produto e as suas informações (ou VIII – conteúdo) associados. Por último, enfatizam também o Cliente (VII) no processo de fabrico, que é um interveniente muito importante na VC e o detentor da razão dos acontecimentos [52].

Em 2014, Zamfirescu *et al.* publicaram um artigo [59] onde refinaram o modelo do ACPS – sistema ciber físico Antropocêntrico para *Smart Factories*, que os mesmos autores propuseram em 2013 [60]. Nestes artigos os autores identificaram o papel crucial que o fator humano desempenha num CPS. Os seres-humanos não são apenas utilizadores do CPS, mas sim elementos do sistema que

afetam seu comportamento geral. Para essa afetação decorrer da melhor forma possível, a dimensão humana deve, portanto, ser incluída como parte integrante de um CPS, entre as dimensões ciber e física. Voltando atrás na dissertação, como foi salientado no subcapítulo 2.1, o ser humano é considerado um dos componentes inevitáveis para a Indústria 4.0 ser bem-sucedida [21]. O estudo e a padronização das suas ações e interações no CPS é, portanto, de extrema relevância. Para o efeito, o ACPS define as relações principais entre os seus três tipos de componentes, que são o Componente Físico (PC), Componente Ciber (CC) e o Componente Humano (HC). O estudo destas interações foi completado mais tarde em 2018 por Ahmadi *et al.* [21] e nesta dissertação apresenta-se um compêndio dos dois trabalhos mais à frente na Tabela 2.10 [59]. Estes últimos autores escreveram o artigo [21] de atualização do ACPS, mas primeiro destacaram a importância da introdução dos 3C (Coalizão, Cliente e Conteúdo) como melhoria da Arquitetura 5C. No entanto, ao avaliar a Arquitetura 8C, os autores notificaram que esta não aprofunda a importância das interfaces nem investiga suficientemente os principais componentes das mesmas, o que indicava a existência de lacunas nessa Arquitetura. Os autores endereçaram este problema fazendo grande referência à abordagem do ACPS, avaliando como muito relevante a dissecação que fazem ao enumerarem os Componentes PC, HC e CC. Nesta dissertação conclui-se que este trabalho de Ahmadi *et al.* [21] é de extrema relevância, uma vez que completa e refina a Arquitetura dos 8C, ao propor uma forte e sustentável conexão entre os componentes heterogêneos. Além disso, é introduzida a importância dos parâmetros essenciais para interconexões e interfaces, formulando assim uma arquitetura ACPS melhorada, que os autores intitulam de CPS 3C (três Componentes: HC, CC e PC), que também envolve conceitos apresentados pela Arquitetura 8C. A Figura 2.5 ilustra a abordagem conceptual da Arquitetura 3C.

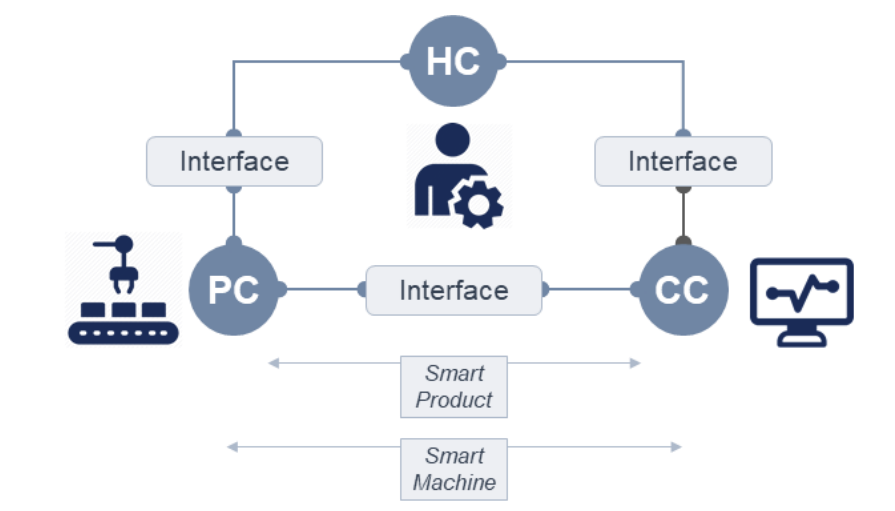


Figura 2.5 – Arquitetura de CPS de componentes 3C, adaptado de [21].

É de destacar a inclusão da *Smart Machine* e do *Smart Product* (referidos anteriormente na Tabela 2.1) entre os componentes PC e CC, o que indica que a máquina, constituída por PC de processos de engenharia, será o ativo onde os CC irão ser incorporados. Na seguinte Tabela 2.10 são, portanto, apresentadas descrições sobre os Componentes 3C e os métodos respetivos, baseadas nos três trabalhos referenciados acima [21], [59], [60]. Uma vez que muita informação já foi escrita de certa forma nas arquiteturas anteriores, nomeadamente na Tabela 2.8 e Tabela 2.9, a Tabela 2.10 que se segue apenas apresenta métodos que completam as arquiteturas anteriores.

Tabela 2.10 – Recursos de CPS relativos aos Componentes 3C, adaptado de [59] e [21].

3C		RECURSOS DE CPS
CC	COMPONENTE CIBER	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Armazenamento de dados – utilizar plataformas virtuais protegidas baseadas e integradas na <i>Cloud</i> para armazenar dados de processamento colaborativo de forma segura e confiável;</li> <li>2. Serviços e gestão de dados – utilizar a técnica de <i>Machine Learning</i> para obter recursos de auto-previsão; utilizar Sistemas de <i>Software-Produto-Serviço</i> Industrial (ISPS), os aplicativos <i>Sense-Compute-Control</i> (SCC) e as novas arquiteturas padrão para <i>networks</i> e <i>middleware</i> industriais.</li> <li>3. Gestão de falhas e manutenção – utilizar módulos inteligentes de assistência e aceleração, sistemas incorporados com modelos de controlo avançado de produção para gestão de falhas e manutenção; para a gestão de manutenção e reparação, contruir uma cadeia de processos de reparação adaptativa, que envolve soluções como sistemas de Manutenção Preditiva e Inteligente (IPdM) para alcançar Fabrico Sem Defeitos (ZDM) e uma <i>framework</i> baseada na <i>Cloud</i> para possibilitar lean MRO (Manutenção, Reparo e Inspeção).</li> <li>4. Projeto de Componentes Ciber – projetar uma IoT de Manufatura com tecnologias em camadas, engenharia de instalações, serviços de monitorização e diagnóstico, organização e localização, modelos de ciclo de vida do sistema em eVC interorganizacionais e Sistemas de Planeamento Avançados (APS); introduzir a arquitetura do Sistema Multi-Agente (MAS); utilizar a Integração de Controlo de Processo e Qualidade utilizando tecnologia MAS (GRACE); integrar o CPS na <i>Cloud</i> (CCPS); utilizar Aplicações Industriais Complexas (CIA); utilizar modelos de resolução múltipla de uma célula de fabrico.</li> </ol>
HC	COMP. HUMANO	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Técnicas de aprendizagem – capacitar os operadores, uma vez que a substituição dos sistemas tradicionais pelo CPS exige mais e melhores competências por parte dos operadores, originando a necessidade de técnicas que façam da aprendizagem um processo célere; exemplos de soluções são os manuais de instruções interativas em Realidade Aumentada (AR).</li> <li>2. Modelação centrada no ser humano – centrar a modelação dos processos em coordenação genérica com a atividade do operador; permitir a integração rápida e de valor acrescentado da inteligência humana;</li> </ol>
PC	C. FÍSICO	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Comunicação – integrar módulos de hardware seguro e sistemas de automação de controlo.</li> <li>2. Interação Máquina-a-Máquina (M2M) – modelar interações M2M; modelar interações do CPS de Smart-M3, (Multi-fornecedor, Multi-dispositivo e Múltipla parte); modelar interações entre robôs e outros equipamentos industriais.</li> </ol>

Ahmadi *et al.* [21] escreveram muito conteúdo sobre as interfaces dos 3C, referenciando vários autores que descreveram medidas de ação e tecnologias aplicáveis. Na Tabela 2.11 foi elaborada uma sistematização desse conteúdo.

Tabela 2.11 – Medidas de ação relativas às interfaces dos 3C, adaptado de [21].

		RECURSOS DE CPS
HC	↕	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Utilização da <i>framework</i> de estruturação adaptativa que foge da visão tecnocêntrica do uso de uma tecnologia e realça o aspeto antropocêntrico, já que o operador que usa uma tecnologia na sua tarefa cria uma perceção e um modo pessoal de utilização e da função da tecnologia; a perceção e modo de utilização de uma tecnologia é dissimilar entre pessoas e tem uma grande influência sobre a maneira de como a tecnologia é mais usada;</li> <li>2. Utilização de adaptadores e.g.: dispositivos de Interação Humano-Computador (HCI), como ecrãs, ratos, teclados, etc.</li> </ol>
CC		<ol style="list-style-type: none"> <li>3. Agendamento auto-organizado dos tempos de trabalho de produção, para possibilitar uma maior flexibilidade na utilização de mão-de-obra.</li> <li>4. Utilização de postos administrativos de Indústria 4.0 e postos de trabalho que oferecem Sugestões Orientadas ao Tema Corrente para posterior Redesign de Fábrica (SURF);</li> <li>5. Computação visual de soluções de ITC;</li> <li>6. Utilização da Linguagem de Modelação Unificada (UML) para a IoT (UML4IoT).</li> </ol>
PC	↕	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Utilização de adaptadores e.g.: transdutores especiais ou conversores de analógico para digital;</li> <li>2. Aquisição de dados através da classificação automática das especificações técnicas. Esta classificação é possibilitada por uma organização semântica do processo e de uma transformação RDF (Resource Description Framework) da AML.</li> </ol>
CC		<ol style="list-style-type: none"> <li>3. Aquisição de dados através de protocolos de roteamento de MWSN sensíveis a atrasos.</li> <li>4. Utilização de componentes de Interface Ciber-Física (CPI) e.g. transmissores RFID e Sistemas de Automação Industrial (IAS), localização e rastreamento.</li> </ol>

RECURSOS DE CPS	
HC ↓ PC	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Supervisão e colaboração dos operadores no sistema automatizado de uma forma “man-in-the-mesh”, num ciclo contínuo de adaptação mútua entre HC e PC no processo de fabrico;</li> <li>2. Implementação de um processo distribuído de aquisição, propagação e processamento de informações para possibilitar uma cognição distribuída e bem estabelecida entre a rede de humanos e artefactos;</li> <li>3. Incorporação e posicionamento da cognição humana com o poder de detetar padrões refinados e correlações entre milhões de sinais multidimensionais, cuja transferência para sistemas computacionais é impossível ou impraticável;</li> <li>4. Integração de adaptadores, e.g.: expositores ou medidores especiais para medir os parâmetros de trabalho de uma máquina.</li> <li>5. Utilização do WFM nas HMI e na troca de dados entre todos os módulos M2M e M2H;</li> <li>6. Utilização de dispositivos portáteis;</li> <li>7. Utilização de Tecnologias Inteligentes Incorporáveis (<i>Wearables</i>) baseadas em lentes que suportam as atividades dos operadores no contexto de fabrico, e.g. Monitores HMD;</li> <li>8. Utilização de serviços sensíveis ao contexto e ao utilizador, que utilizam modelos MVCE;</li> <li>9. Aplicação de Mecatrónica de auto-otimização;</li> <li>10. Utilização de Robôs Sociais;</li> <li>11. Utilização de Interfaces humano-ciber/computador (HCI) com interfaces TUI (Tangible User Interface).</li> </ol>

Ahmadi *et al.* [21] ofereceram ainda no seu artigo o resultado de uma investigação sobre os conectores de componentes e também sobre os protocolos de interfaces. Os autores relembram que para a comunicação entre máquinas ser sustentável e eficiente, os conectores são muito importantes e devem ter grandes capacidades. Os protocolos são os alicerces da comunicação eficiente e eficaz entre dispositivos e máquinas num contexto de CPS, uma vez que se ajustam de maneira adaptativa ao estabelecer uma *network* confiável. Na troca de informações, e.g. num envio de dados da produção do nível de controlo de processo para o nível administrativo de IT da empresa exige requisitos específicos de vários prestadores e utilizadores de serviços. Os autores [21] concluíram o artigo classificando a abordagem dos três componentes como teórica e referiram que a validação da mesma depende da aplicação no contexto industrial em trabalhos futuros.

Uma interpretação a fazer dos oito níveis C (conexão, conversão, ciber, cognição, configuração, coalizão, conteúdo e cliente) descritos e apresentados no subcapítulo 2.2.2, é a elaboração dos respectivos requisitos do CPS. De facto, se o que se pretende é projetar e desenvolver um CPS, um passo importante será elaborar questões como por exemplo: *quais as necessidades de conexão das máquinas, dispositivos e produtos no processo em causa?* E a pergunta seguinte: *em que requisitos se traduzem cada uma das necessidades?* Os oito níveis oferecem, portanto, uma sistematização de requisitos do CPS. Ainda assim, a Literatura sugere que existem mais requisitos essenciais. Alguns deles são abordados de certa forma nos oito níveis (e.g. requisitos de capacidade de armazenamento e processamento de dados já estão incluídos no nível ciber). Não obstante, é necessária uma sistematização adicional destes requisitos, apresentada na Tabela 2.12, transversais aos oito níveis. Evidentemente existem muitas correlações entre os requisitos, e.g. os requisitos de flexibilidade do CPS dependem dos requisitos de tempo, ou a fiabilidade depende da validade e credibilidade. Ainda assim, esta listagem pode ser útil para uma abordagem holística de desenvolvimento de CPS, a fim de alavancar mais capacidades no sistema.

Tabela 2.12 – Lista de requisitos do CPS, adaptado de [39], [61], [62].

REQUISITO	DESCRIÇÃO
CREDIBILIDADE	Autenticação e identificação das fontes de recolha de informações ou dos remetentes de instruções de controlo; capacidade de obter exatamente a identidade real do remetente para evitar a falsificação [61].
DISPONIBILIDADE	Tanto a fiabilidade quanto a facilidade de manutenção devem ser fatores prioritários, a fim de alcançar uma elevada disponibilidade de funcionamento do sistema [62];
ENERGIA	Gestão de energia do sistema. O tamanho compacto e a operação autónoma de alguns componentes do CPS tornam a gestão de energia uma prioridade crítica do projeto de engenharia [39].
ESTABILIDADE	Propriedade de um sistema dinâmico e estocástico, que envolve fatores como linearidade ou não linearidade do sistema, largura de banda, taxa de amostragem, polos e zeros do sistema, modelação do ruído e de incertezas, limitações de sensores e atuadores, como corrupção ou saturação de ruído [39].
FIABILIDADE	Propriedade do sistema não falhar. Continuidade e previsibilidade do sistema. Garantia de que o CPS não terá que ser várias vezes corrigido durante os testes e funcionamento real. Robustez às incertezas. Tal pode ser alcançado se as incertezas forem rastreadas, processadas e tratadas durante a implementação [39], [62].
FLEXIBILIDADE	Interoperabilidade e adaptabilidade entre componentes e sistemas heterogéneos [39]. Capacidade de alocar recursos para várias tarefas a qualquer momento e atempadamente [61]. Depende do requisito de Padronização.
MANUTENÇÃO	É a probabilidade de que a falha do sistema seja solucionada num intervalo de tempo definido [62].
PADRONIZAÇÃO	Propriedade de que possibilita os sistemas serem compostos por componentes de diferentes fornecedores e serem operados por entidades diferentes. Atingir a interoperabilidade requer conhecimento de como definir e usar arquiteturas comuns, interfaces padronizadas e standards de dados [39].
SEGURANÇA FÍSICA	Garantia de segurança das ações que surtam efeito em seres humanos e no ambiente envolvente; avaliação e gestão dos riscos associados [39].
SEGURANÇA LÓGICA	Garantia da comunicação sem falhas. Criptação e deciptação de informações enviadas ou recebidas, e preservação da confidencialidade [61], [62].
USABILIDADE	Design de fatores humanos, e.g. o controlo humano em <i>loop</i> , compreensão e contabilização das respostas comportamentais dos seres humanos [39].
VALIDADE	Precisão do processamento, bem como a validade e a integridade das informações ou do conjunto de instruções devem ser garantidas para evitar que as incertezas e ruídos no processamento do CPS afetem a precisão do processamento do sistema [61].

Para alavancar os capítulos 3 e 4 desta dissertação, é necessário obter um conhecimento integral dos componentes, funcionalidades e requisitos de CPS. No presente subcapítulo 2.2.2 estão coligidas várias abordagens de conceptualização e sistematização destes três tópicos, resultando em vários modelos conceptuais que têm pontos em comum. Neste sentido, no subcapítulo 2.1 está também documentada uma revisão de literatura sobre vários aspetos da Indústria 4.0, que são também relevantes para o Design de CPS, nomeadamente as disciplinas de *Smart Manufacturing*, os Princípios de Design e os Conceitos Tecnológicos da Indústria 4.0. Para recapitular celeremente tudo isto, e a fim de criar um guia de referências visual para daqui em diante, na página seguinte é exposto o Modelo Conceptual Final de Design de CPS (Figura 2.6). Depois de uma análise minuciosa a todos os conteúdos, escolheu-se a Arquitetura 8C para base do Modelo Conceptual Final por ser a mais holística. Por conseguinte, cada um dos oito níveis foi complementado com medidas de ação, funcionalidades e componentes dos restantes modelos e arquiteturas. Para esse efeito foi realizado um exercício de comparação e correspondência, ilustrado nas interligações no canto superior esquerdo da Figura 2.6. O objetivo não foi esmiuçar ao máximo detalhe todas as ligações de todos os modelos, mas sim realizar (e demonstrar a realização) do exercício de conjugação e complementação de conceitos do modelo base.

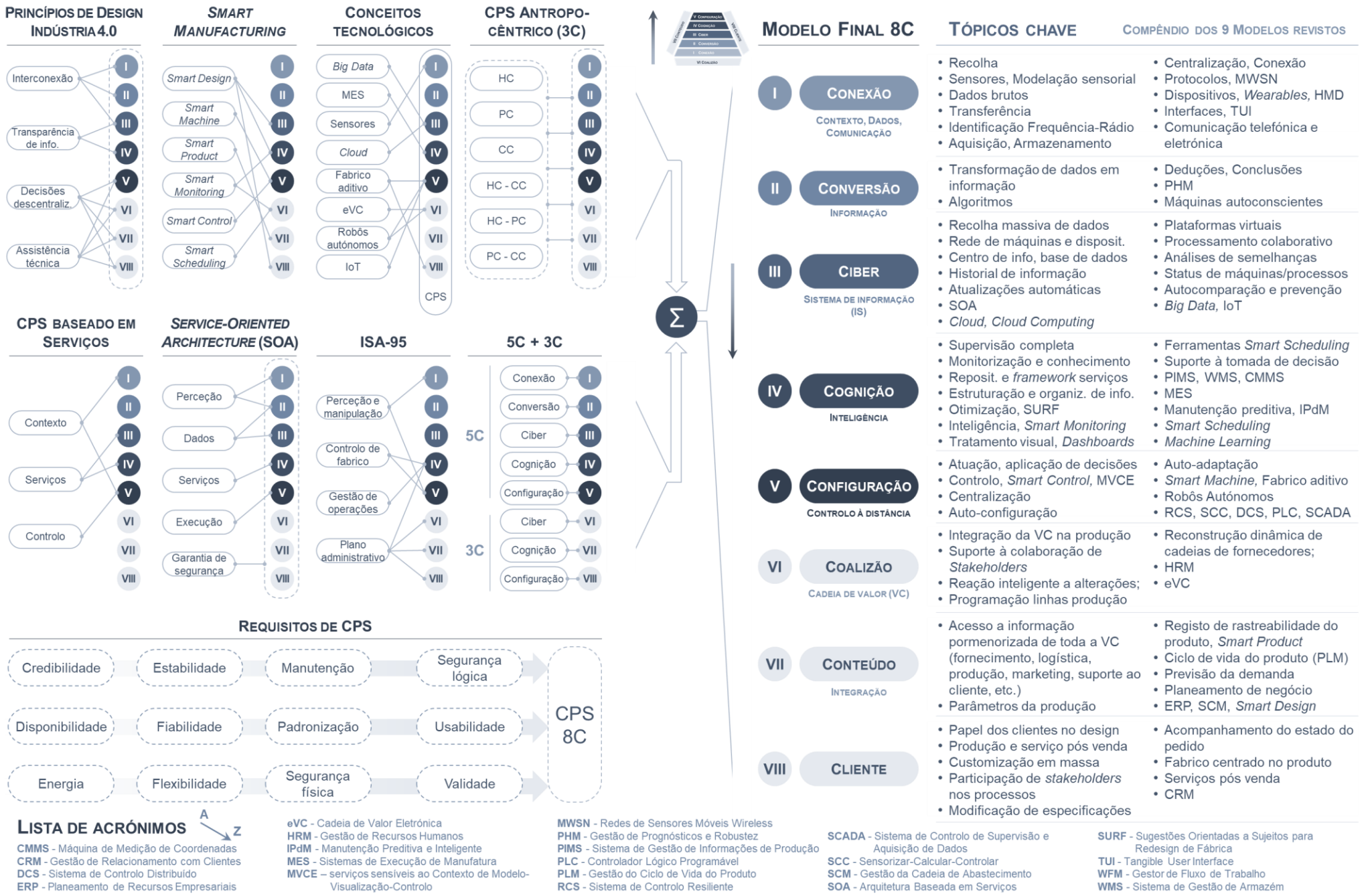


Figura 2.6 – Modelo CPS Final: Esquema resumo dos componentes, funcionalidades e requisitos.



## 2.3. ABORDAGENS EXISTENTES SOBRE O DESIGN DE CPS

No âmbito acadêmico relacionado com o CPS, “design” é um termo muito utilizado, que segundo o dicionário de Cambridge remete para “*plano ou desenho*”, “*desenho ou conjunto de desenhos que mostram como um edifício ou produto é para ser feito, como irá funcionar e parecer*” e “*maneira segundo a qual algo é planejado e realizado*”. Assim, “design” foi também o termo escolhido nesta dissertação, que remete para o projeto, não só de design, mas também de desenvolvimento iterativo de CPS. O termo de tradução “projeto” podia também ser o escolhido, tal como fez Pires em 2018 [62].

De acordo com o relatório de 2016 das Academias Americanas de Ciências, Engenharia e Medicina [39], construir um CPS que opere em fiabilidade na presença de incertezas e com níveis aceitáveis de risco, requer uma compreensão de como abordar os princípios e fundamentos do design do CPS. Analogamente ao procedimento do subcapítulo 2.1.4 (Princípios de Design da Indústria 4.0), é necessário chegar aos Princípios de Design do CPS se se pretende sistematizar o conhecimento e descrever os constituintes elementares do design do CPS. Tal sistematização genérica de alto nível é fundamental, para depois elaborar uma abordagem holística ao design do CPS.

Assim, o objetivo deste subcapítulo 2.3 é apresentar uma revisão dos principais artigos da literatura recente que abordaram o design de CPS de uma perspetiva de alto nível e num estado primordial, ou seja, o alvo da pesquisa foi a busca dos Princípios de Design, dos modelos conceptuais e das abordagens de design existentes. A fim de tirar conclusões deste subcapítulo 2.3, é apresentada no subcapítulo 2.3.2 uma análise aos diferentes métodos, procurando compreender se estes concernem, se fundamentam inicialmente, ou pelo menos sugerem que se comece por analisar o BM da organização em causa. Essa análise é feita não só aos artigos de cada uma das metodologias encontradas e expostas no subcapítulo 2.3.1, assim como aos artigos relacionados (que citaram os autores das metodologias apresentadas). Este último subcapítulo indica a lacuna existente na Literatura, abrindo assim as portas para a abordagem metodológica, apresentada no capítulo 3.

### 2.3.1. METODOLOGIAS DE DESIGN DE CPS

Conforme escreveram Hehenberger et al. [63], o design de CPS requer a introdução de métodos integrados de alto nível nos quais os projetistas considerem todas as disciplinas de engenharia simultaneamente, juntamente com questões operacionais, como a segurança lógica. As fases iniciais do design, como o design conceptual e a modelação do sistema, desempenham papéis importantes no design e são consideradas as bases que possibilitam a forma final do sistema.

Segundo Jensen et al. [64], as técnicas de design de CPS que são frequentemente utilizadas incluem as seguintes etapas: modelação matemática de sistemas físicos, modelos formais de computação, simulação de sistemas heterogéneos, síntese de *software*, verificação, validação e teste. Estas etapas são sofisticadas, mas o conjunto parece não descrever completa e exaustivamente todas as fases do desenvolvimento do CPS. Dada a complexidade que um sistema destes pode requerer, de acordo com os autores [64], advém a necessidade de encontrar um conjunto de etapas sequenciais que ao serem seguidas minuciosamente e corretamente abranjam cada uma das técnicas de design e governem metodicamente o desenvolvimento do CPS. Lee e Seshia [41] abordaram o problema declarando que o processo de desenvolvimento do CPS deve consistir em três fases, “modelação”, “design” e “análise”, cujas descrições se encontram na Tabela 2.13. Estas três fases sobrepõem-se e podem ser reestruturadas caso sejam identificadas falhas no protótipo inicial (ver Figura A – 1).

Tabela 2.13 – Três fases do processo de desenvolvimento do CPS, adaptado de [41], [62].

FASE	DESCRIÇÃO
MODELAÇÃO	Processo que especifica a função do sistema ( <i>o que faz</i> ): obter um entendimento mais profundo do meio físico; refletir sobre as propriedades do meio físico especificando o que pode ser feito ou não.
DESIGN	Seleção dos componentes enquanto se os reúnem ( <i>como funciona</i> ): construção de elementos de computação integrados com os diversos recursos de processos concorrentes e tempo real; criação estruturada dos elementos de computação especificados para o meio físico; combinação das diferenças entre os componentes físico e virtual.
ANÁLISE	Especificação da razão pela qual cada função do sistema foi estabelecida ( <i>especificar o porquê de o sistema fazer o que faz, ou o porquê de o sistema fracassar em fazer o que o modelo indica</i> ): aplicação de métodos para especificação de comportamentos de risco e sucesso e <i>checklists</i> das implementações de acordo com as especificações iniciais; processo de obter uma compreensão do sistema como um todo.

Karsai e Sztipanovits [65] comentaram esta abordagem referindo que um bom design é mais do que funcional; também deve antecipar modos de falhas e defeitos e ser capaz de os gerir. Segundo os autores, os componentes físicos e computacionais devem ser modelados, projetados (design) e analisados em conjunto. Além de Lee e Seshia [66], existem mais abordagens ao procedimento de desenvolvimento e design do CPS [67]. Alguns autores referem-se especialmente a desafios de design, aspetos críticos e respetivas soluções possíveis. Um exemplo é o trabalho de Kim e Mosse [68] que apresenta os recursos essenciais numa estrutura genérica para o design do CPS, apresentados na Tabela 2.14.

Tabela 2.14 – Recursos essenciais para o design de CPS, adaptado de [68].

#	RECURSO (AÇÕES DE DESIGN)
1	Usar vários tipos de aplicativos de suporte, como sensores e atuadores, para simular lógicas heterogêneas de aplicativos.
2	Possuir vários ambientes de modelação física, suportados por expressões matemáticas.
3	Possuir suporte de escalabilidade para simular em pequena escala e, conseqüentemente, nas escalas reais dos dispositivos físicos.
4	Ter suporte de mobilidade para modelação, usando as propriedades mais significativas, como a intensidade de sinal.
5	Integrar e vincular as ferramentas de simulação existentes.
6	Integrar soluções de propriedades e suporte de <i>standards</i> , como <i>software</i> e protocolos existentes.
7	Representar graficamente os contextos de modelação e simulação, para permitir o desenvolvimento de outros aplicativos.

Prasad e Son [69] apresentam as principais questões relacionadas com o desenvolvimento do CPS, considerando interações complexas entre comunicação, computação e componentes físicos. Embora se refiram ao design do CPS, o trabalho concentra-se apenas nas fases de modelação e análise [67]. Lee [37] não apresenta um procedimento para o design do CPS, mas recomenda repensar a computação e a *network* para atender aos requisitos identificados para o CPS [67]. La e King [50] sugere um processo de design levando em consideração as camadas do CPS por eles propostas: Contexto, Serviço e Controlo. As fases de design propostas são três e estão ilustradas na Figura A – 1: (1) Definição de requisitos para o CPS, (2) Análise de requisitos, (3) Design de arquitetura de cada camada. A fase (3) divide-se em três etapas: (3.1) Design, (3.2) Implementação e (3.3) Instalação. Cada uma destas etapas deve ser desempenhada para cada camada da Figura 2.3.

Jensen *et al.* [64] escreveram também que uma das tarefas desafiadoras é projetar subsistemas

heterogêneos. Focando-se em metodologias de design, propuseram uma metodologia de design baseado em modelos (MBD) para o CPS. Sucintamente, o MBD consiste em salientar a modelação matemática para projetar, analisar, verificar e validar sistemas dinâmicos. O MBD proposto consiste em dez etapas (descritas sucintamente na Tabela 2.15). Os autores afirmaram que cada etapa oferece apenas uma introdução a um vasto campo de pesquisa. Explicaram também que a implementação prática desta metodologia é visitar iterativamente cada etapa até os requisitos serem alcançados.

Tabela 2.15 – Dez etapas do design de CPS baseado em modelos (MBD) [64].

#	ETAPA	DESCRIÇÃO CURTA
1	DECLARAR O PROBLEMA	Descrição do problema a ser resolvido e apresentação dos requisitos de projeto.
2	MODELAR PROCESSOS FÍSICOS	Representação do contexto físico por modelos matemáticos e aperfeiçoamento iterativo dos mesmos.
3	CARACTERIZAR O PROBLEMA	Isolamento de parâmetros fixos e variáveis controláveis para caracterizar processos físicos.
4	DERIVAR UM ALGORITMO DE CONTROLO	Desenvolvimento de um algoritmo de controlo para controlar e medir adequadamente a dinâmica física.
5	SELECIONAR MODELO DE COMPUTAÇÃO	Seleção de instruções permitidas que interajam e comuniquem com os componentes computacionais.
6	ESPECIFICAR HARDWARE	Seleção de hardware adequado para a interação com os sistemas físicos e implementação de algoritmos de controlo.
7	SIMULAR	Simulação computacional da solução do problema.
8	CONSTRUIR	Desenvolvimento de dispositivos de acordo com especificações definidas.
9	SINTETIZAR SOFTWARE	Sintetização de código para executar fielmente a semântica dos modelos.
10	VERIFICAR, VALIDAR E TESTAR	Teste de componentes, refinamento de modelos anteriores e verificação de requisitos.

No processo de revisão de literatura sobre o design foram estudados alguns artigos onde autores intitularam os trabalhos utilizando a palavra ‘design’ ou ‘desenvolvimento’ de CPS. Porém as abordagens realizadas não descrevem nem um design nem um desenvolvimento suficientemente minucioso, que aprofunde as várias etapas e a metodologia composta pelas mesmas. Um exemplo que corrobora esta aferição é o artigo publicado por Švédá e Radimir [70], intitulado “Uma abordagem ao design de CPS”, mas consiste essencialmente numa breve revisão do estado da arte dos CPS, que inclui os recursos típicos do design e as propriedades importantes que podem ser implementadas em aplicativos computacionais. Ou seja, não endereça realmente a resolução do problema de como projetar um CPS.

Até esta fase da investigação, é de salientar que nenhuma das metodologias apresentadas abordou o design do CPS segundo uma visão de foco na razão pela qual o sistema é para ser projetado. Partindo da consciência que o CPS deve primeiro ser pensado conceptualmente, e só depois modelado, projetado e analisado, sempre em prol do objetivo final de fabricar produtos que satisfaçam as necessidades da procura de mercado. Esta abordagem *top-down*, do cliente para produção ou por outras palavras “*pull*” ou “em cascata” i.e. nada é feito a montante sem que o mercado sinalize uma necessidade a jusante, é o tópico de discussão do capítulo 3. Orientando a investigação para abordagens ao design de CPS alinhadas com esta ideia, nas linhas seguintes são apresentados os resultados desta pesquisa. Em 2016, Zheng *et al.* [71] elaboraram um artigo cujo objetivo era rever diferentes metodologias de design de CPS propostas na Literatura. A sequência de trabalhos que os autores

levaram a cabo foi: identificação dos principais desafios do design, geração de critérios derivados desses desafios e avaliação de onze metodologias expostas na Literatura segundo esses critérios. As metodologias avaliadas foram agrupadas em três categorias e a que suscita interesse no âmbito da presente dissertação é a primeira: metodologias baseadas em Modelo-V. Isto porque estas metodologias de CPS assentam no conceito de fluxo geral para o processo de desenvolvimento de produto e começam com a identificação dos requisitos do usuário. Uma vez definidos, são colocados sob controlo durante o design (ramo esquerdo do Modelo V) e o Modelo V termina com um sistema validado pelo usuário (ramo direito do modelo V). Para chegar ao produto final, cada fase da definição do produto deve ser testada. Está-se perante uma primeira abordagem que parte das necessidades do usuário. Este foi o único artigo encontrado na investigação onde se encontra uma aproximação à metodologia de desenvolvimento de produto aplicada ao CPS. Neste artigo, o “produto” é o CPS como um todo e o “utilizador” ou “consumidor”, neste caso é a empresa. Mais uma vez, esta abordagem é o tópico central do capítulo 3. Apesar de parecer indicar o caminho para um design bem-sucedido, os autores afirmam porém que estas metodologias baseadas no Modelo-V apenas oferecem um fluxo de desenvolvimento geral e as fases de design devem ser detalhadas de acordo com as particularidades do CPS. Ou seja, esta a metodologia de Modelo-V necessitava de ser trabalhada. Os autores encontraram duas abordagens que refinaram o Modelo-V: (i) uma fez a decomposição do ramo esquerdo do Modelo-V propondo fases de design detalhadas, enfatizadas através de pontos de vista que partem dos requisitos e passam pelas vistas funcional, lógica e técnica e (ii) outra tratou da integração do comportamento do processo físico e da ação humana. No fim do artigo, Zheng *et al.* [71] chegaram à conclusão que diferentes métodos de design do CPS foram propostos até então. No entanto, a partir da avaliação feita a cada uma das onze metodologias puderam também concluir que as metodologias de design existentes não ajudam os projetistas a superar os desafios de design do CPS [71].

Resumindo e concluindo, existem várias metodologias de design de CPS na Literatura, mas nenhuma é de facto simples, eficiente e completa. Alguns autores referem-se ao design do CPS como o procedimento de design da arquitetura do CPS [52]. Outros focam-se essencialmente na abordagem de arquitetura, e nesses casos não existe um procedimento de design definido para o CPS [55], [67]. Dos poucos procedimentos que existem, nenhum demonstra ser suficientemente detalhado e nenhum aborda minuciosamente as etapas de desenvolvimento de soluções para as necessidades de um sistema produtivo.

### **2.3.2. APLICABILIDADE E LIMITAÇÕES**

Tendo em conta que o epicentro da presente dissertação é a adequabilidade das características do CPS face ao contexto e a empresa em causa, foi aprofundada a investigação sobre as metodologias existentes para o design de CPS, estudando as aplicações que os autores expõem nos respetivos artigos e a adequabilidade da metodologia proposta à identificação e satisfação das necessidades de produção e de operações de um negócio. Uma vez que o objetivo deste trabalho é a criação de uma metodologia de CPSDD que seja aplicável ao tipo de empresa e ao seu BM, foi realizada uma análise aos artigos referenciados no subcapítulo anterior, para compreender os passos que já foram dados nesta direção.

A metodologia de design proposta por Lee e Seshia [41] oferece muita informação sobre cada uma das fases de design, de forma extensa e complexa, desde como modelar realidades físicas (desde

dinâmica contínua e discreta até modelos de computação), como projetar um sistema incorporado (desde transdutores, arquiteturas de memória e até *multitasking*) e como realizar a análise e verificação (invariâncias, análise quantitativa, segurança e privacidade). Ou seja, a abordagem é essencialmente teórica e conceptual não existindo indicações de como adaptar ou aplicar a cada contexto específico. De facto, não é apresentada de forma clara como adaptar todos estes conceitos teóricos a um contexto empresarial particular. Foram ainda investigados artigos nas bases de dados *online* que tenham citado o livro de Lee e Seshia [41] (como [42], [72], [73]) na busca de aplicações em contextos de produção, mas sem sucesso.

O artigo de Kim e Mosse [68] tem como título “Metodologia genérica para o design, modelação e simulação de CPS” e de facto não apresenta concretamente uma metodologia de design, simplesmente apresenta medidas necessárias nas metodologias de CPS. No artigo também não é oferecida nenhuma explicação de como aplicar esta abordagem a contextos reais. Ao invés, é elaborada uma análise dos desafios e benefícios da abordagem genérica de design, e os autores escreveram que esta é importante antes de “*definir o escopo dos domínios alvo, obter casos de uso exaustivos e desenvolver a arquitetura e as soluções de software para uma estrutura genérica*”. Foram também pesquisados na literatura casos de aplicação deste modelo apresentado por Kim e Mosse [68] mas não foi encontrada nenhuma aplicação direta e clara.

O artigo onde o MBD é proposto por Jensen *et al.* [64] apresenta também um estudo de caso de aplicação da metodologia de dez etapas (ver Tabela 2.15). O contexto real escolhido foi um produto que consiste num dispositivo de tunelamento de bola, que segundo os autores, é um sistema que os autores afirmam ser extensível a uma plataforma distribuída, apresentando um exemplo para modelar CPS distribuídos [64]. Os autores concluíram que o MBD se demonstrou essencial em quase todos os aspetos do desenvolvimento, mas a apresentação de cada uma das etapas investigadas indica que cada etapa se refere a um vasto campo de pesquisa e, portanto, este artigo é uma introdução a cada um desses campos. O artigo não apresenta uma abordagem de aplicação que tenha em conta outros contextos industriais ou de produção, mas o trabalho de Jensen *et al.* [64] foi utilizado por diversos autores como Abdullah *et al.* [74] que adaptaram e aplicaram o MBD num estudo de caso sobre eletricidade residencial. Foram identificados outros artigos (e.g. [75], [76]) que referenciaram Jensen *et al.* [64], mas não foi encontrada nenhuma aplicação industrial de produção. Assim, não se encontrou também uma explicação clara de como aplicar a metodologia a um contexto real de negócio de indústria de produção. O artigo publicado por Zheng *et al.* [71] é um artigo de revisão de Literatura e nessa revisão não é identificada a existência de um modelo que permita o design de CPS adaptado ao contexto industrial específico de uma empresa.

Em suma, não foi encontrada nenhuma proposta de abordagem ou metodologia de design de CPS com adequação às necessidades específicas de uma empresa particular, tendo em conta as características da sua produção e operações, e do seu BM. Nas metodologias analisadas, os processos de design não se focam na identificação das necessidades e, portanto, não podem cumprir por si só o objetivo de corresponder minuciosamente às necessidades de um sistema produtivo e/ou de um BM específico. De facto, estes artigos estão essencialmente concentrados na construção de um sistema que cumpra muitos dos princípios da Indústria 4.0, mas não incluem nenhuma adaptação prática e foco ao tipo de empresa ou BM, que é um dos fatores essenciais. A maioria dos autores aplicam as metodologias a produtos, não providenciando ferramentas que ajudem à contextualização e compreensão

se a empresa em si precisa ou não de todas as componentes e Conceitos Tecnológicos que um CPS pode empreender. Além de não apresentarem nenhuma aplicação também não se referem à aplicabilidade da respetiva metodologia exposta, logo conclui-se também aqui que há muito trabalho pela frente no que se refere à aplicação destes métodos de forma a se tornarem instrumentos úteis para o design de CPS. É necessário definir um procedimento de design de acordo com a definição e os requisitos do CPS. É fundamental definir um processo de desenvolvimento, a fim de garantir a qualidade do design, coordenar e definir as funções de cada colaborador, planejar e agendar o projeto geral, gerir e controlar o processo e identificar oportunidades de melhoria. Não obstante, este conjunto de autores expôs muita informação útil, ponto de partida para a elaboração da metodologia proposta nesta dissertação.

## 2.4. CONCLUSÕES

O presente capítulo 2 permitiu chegar a várias conclusões relativas à Indústria 4.0 e aos CPS. Em primeiro lugar, o CPS é uma das bases da *Smart Factory*, que é o coração da Indústria 4.0 [1], [2], e tem ganho cada vez mais importância nos últimos anos, por ser a chave da transformação de um sistema produtivo tradicional para um sistema produtivo inteligente com capacidades muito superiores [4], aumentando a competitividade. Isto levou a que muitos governos criassem organizações a fim de investigar e desenvolver ações com impacto na indústria em direção aos CPS e à *Smart Manufacturing* [1]. Ficou salientado que Indústria 4.0 é sustentada por quatro Princípios de Design, que o CPS incorpora na totalidade e é por isso que faz sentido declarar que o CPS é um elemento basilar na concretização e o suporte da Indústria 4.0. Além disso, o CPS é um dos nove Conceitos Tecnológicos da Indústria 4.0 e é o Conceito Tecnológico que engloba e é composto por todos os outros Conceitos Tecnológicos (caso seja necessário). Em segundo lugar, o conceito de CPS está estabelecido na Literatura e as várias definições revelam semelhanças que possibilitam chegar a uma definição final consensual. Das abordagens conceituais que tentaram enumerar os componentes e funcionalidades de um CPS, a Arquitetura de CPS de 8C (ver Figura 2.4) é a mais holística, no entanto todas as outras abordagens providenciam informação e modelos que complementam estes 8C e resultam na proposta de Modelo Final de componentes e funcionalidades de CPS, modelo esse que é utilizado no capítulo 4. Em terceiro e último lugar, apesar de a Literatura expor várias metodologias de CPSDD, não existe nenhuma que sirva de guia para a identificação das necessidades do sistema produtivo (ou do CPPS) e para a satisfação dessas necessidades através de uma metodologia processual de design e desenvolvimento que em cada etapa se foca na razão pela qual tudo acontece: a satisfação da procura de mercado, que pode ser identificada através do BM da empresa. Existe aqui uma lacuna na qual se insere a presente dissertação, uma vez que não existe nenhuma metodologia que se guie pelo BM da empresa e a ajude a compreender que componentes, funcionalidades e requisitos de CPS é que o sistema de produção e o negócio inerente em causa realmente necessitam. Até então a Literatura expõe como desenvolver um CPS com todas as suas capacidades, e não como desenvolver um CPS só com as capacidades estritamente necessárias e alinhadas com o BM. Assim, como introdução e passagem à proposta de metodologia apresentada no capítulo 4, no capítulo 3 é apresentada a abordagem metodológica: o design e desenvolvimento de produto aplicado ao CPS.

### **3. O DESIGN E DESENVOLVIMENTO DE PRODUTO (PDD) APLICADO AO SISTEMA CIBER-FÍSICO**

Uma questão que pode surgir quando se coloca a ideia de construir um CPS é a seguinte: *Fará sentido desenvolver um CPS que detenha as capacidades de todos os oito níveis da Arquitetura 8C, que podem envolver elevado investimento em tecnologia e em projeto, se o valor que o mercado deseja não necessita de tais capacidades e não há justificação para tamanho investimento?* A resposta a esta pergunta é a hipótese proposta nesta dissertação. Por exemplo, pode não fazer sentido investir em robôs autónomos ou em ITC complexos, se não há necessidades no BM que justifiquem tal investimento. Poderia existir uma empresa cujo desenvolvimento de CPS apenas consiste em adquirir alguns dados de duas máquinas, para controlo de supervisão, e facilitar a comunicação entre colaboradores e clientes, através do *Whatsapp* por exemplo. O objetivo não é desenvolver o melhor CPS possível, mas sim o CPS que melhor satisfaz as necessidades de interação da empresa com o mercado. Ou seja, a abordagem de desenvolvimento de CPS deve estar focada no BM da empresa.

Nesse sentido, o desenrolar desta abordagem pode resultar nas seguintes questões: *Quais as necessidades do BM? Qual é o valor que os clientes precisam ou desejam? Quais são as características do sistema produtivo necessário para produzir esse valor? Como irá o sistema produtivo comportar-se? Que informações precisa de arrecadar e terá de providenciar? E a quem?* São estas e tantas outras perguntas que a aplicação da Metodologia de Design e Desenvolvimento de Produto (PDD) de Eppinger e Ulrich [77] ao design de CPS pode ajudar a responder. Importa recordar que um CPS pode fornecer capacidades superiores, que permitem alcançar objetivos diferentes e, por vezes, mais competitivos que os de um sistema tradicional [4]. Por isso, um trabalho futuro, relacionado com a presente dissertação, incluiria a reformulação do BM alavancado pelas capacidades de um CPS, tópico que sai do âmbito da presente tese.

Assim, nos subcapítulos seguintes, discute-se então o potencial de aplicação da Metodologia de PDD [77] ao Design e Desenvolvimento de CPS (CPSDD), juntamente com uma análise de aplicabilidade de cada Fase e cada Etapa. Finalmente é apresentada uma análise geral final, onde se conclui de que modo esta abordagem procura colmatar a lacuna de métodos e conhecimentos de Design de CPS, identificada no capítulo dois.

#### **3.1. INTRODUÇÃO À APLICAÇÃO DO MÉTODO PDD AO DESIGN E DESENVOLVIMENTO DE CPS**

De acordo com Eppinger e Ulrich [77], um processo de desenvolvimento de produto é a sequência de etapas ou atividades que uma empresa emprega para conceber, projetar (elaborar o design), prototipar, testar e comercializar um produto. Na presente dissertação, a aplicação da teoria destes autores ao desenvolvimento de CPS é elaborada considerando que o “produto” de desenvolvimento é o CPS. Porém, devido à possível complexidade de um CPS, pode ser melhor declarar que o desenvolvimento de um CPS é o desenvolvimento de vários subsistemas, funcionalidades e componentes. Ou seja, analogamente, um processo de desenvolvimento de CPS é a sequência de etapas ou atividades que uma empresa emprega para conceber, projetar (elaborar o design), prototipar, testar e implementar o CPS e as suas partes. A comercialização é para o CPS a implementação do mesmo para o âmbito da produção, ou a “venda” das suas funcionalidades e capacidades à empresa. A “implementação” inclui não só a implementação do processo de desenvolvimento (que culmina na aquisição e montagem

de componentes e dispositivos), mas também inclui a operacionalização, testes e integração, com o objetivo de assegurar o correto funcionamento do CPS. Em suma, um qualquer produto é concebido, projetado e comercializado ao cliente. Para um CPS, o cliente é a empresa que irá beneficiar do CPS, na medida em que o CPS ajudará a melhorar a sua performance de negócio. É recomendável que o projeto de desenvolvimento siga uma lógica de colaboração mista, onde a empresa produtora e desenvolvedora (Empresa A) contrata uma outra empresa especialista em CPS (Consultora) para desempenhar o projeto de desenvolvimento de CPS. Ou seja, a lógica é este desenvolvimento ser realizado mediante colaboração entre as duas empresas.

Eppinger e Ulrich [77] afirmam que um processo de design e desenvolvimento bem elaborado é útil por cinco motivos: providencia garantias de qualidade, possibilita uma melhor coordenação de pessoas e tarefas, suporta o planeamento do projeto de desenvolvimento, facilita a gestão de projeto e impulsiona ações de melhoria de qualidade das tarefas, do processo e, por conseguinte, do produto fabricado. Através da análise realizada na Tabela 3.1, onde se listam as cinco utilidades referidas, pode-se concluir que todos estes benefícios têm um grande potencial de aplicabilidade ao desenvolvimento de CPS e, portanto, sustentam a necessidade da abordagem metodológica desta dissertação.

Tabela 3.1 – Análise da utilidade de um processo de PDD bem elaborado.

UTILIDADE	PDD [77]	APLICABILIDADE AO CPS
<b>GARANTIA DE QUALIDADE</b>	Um processo de desenvolvimento de produto especifica as fases e atividades através das quais um projeto de desenvolvimento se irá concretizar, assim como os pontos de verificação ao longo do caminho. As fases, atividades e pontos de verificação devem ser escolhidos e planeados minuciosamente para que, uma vez seguido corretamente o processo de desenvolvimento, seja uma maneira de garantir a qualidade do produto.	Como se viu no capítulo 2, um CPS pode ter várias componentes e funcionalidades, distribuídos por sistemas heterogéneos. Para que todas as necessidades e os problemas da empresa sejam corretamente solucionados, refinados e projetados, a “garantia de qualidade” é uma utilidade analogamente aplicável, uma vez que não é possível obter um CPS preciso e que providencie as capacidades que a empresa necessita sem um controlo minucioso da qualidade de cada desenvolvimento particular.
<b>FERRAMENTA DE COORDENAÇÃO</b>	Um processo de desenvolvimento claramente articulado atua como plano mestre, definindo os papéis de cada um dos elementos da equipa de desenvolvimento, informando-os em que momentos é que as suas contribuições serão necessárias e com quem irão trocar informações e materiais.	Para desenvolver e projetar um CPS adequado e ajustado ao BM, pode ser necessário a intervenção de vários elementos e órgãos da empresa, não só para formar a equipa de desenvolvimento do CPS, mas também para providenciar informação crucial sobre os processos e operações. Assim, este tópico demonstra-se também aplicável.
<b>SUPORTE AO PLANEAMENTO</b>	Um processo de desenvolvimento inclui os marcos correspondentes à conclusão de cada fase. Cada um desses momentos ancora o cronograma do projeto de desenvolvimento geral.	O processo de desenvolvimento de um CPS deve também incluir várias atividades, verificações e reflexões a fim de alavancar as melhores soluções possíveis e necessárias (e não desperdiçar tempo e dinheiro). Para isso a elaboração de um planeamento de atividades é aplicável.
<b>FACILITADOR DA GESTÃO</b>	Um processo de desenvolvimento é uma referência para avaliar o desempenho do esforço de desenvolvimento contínuo. Ao comparar os eventos reais com o planeamento de processo estabelecido, um <i>manager</i> pode identificar possíveis áreas problemáticas;	A complexidade de desenvolvimento e de investimento que um CPS pode requerer, gera a necessidade de um controlo de gestão de cada atividade e respetivas atividades, a fim de identificar áreas críticas e podar as atividades que geram desperdício. A capacidade de gestão depende diretamente do ponto seguinte.
<b>IMPULSIONADOR DE AÇÕES DE MELHORIA</b>	A documentação cuidadosa e a revisão contínua do processo de desenvolvimento de uma organização e os seus resultados podem ajudar a identificar oportunidades de melhoria.	Só através de um processo documentado é que se consegue examinar o sucedido e não originar perdas de informação. Aliado ao controlo de gestão, são identificadas oportunidades de melhoria e implementadas ações corretivas no desenvolvimento de CPS.



### 3.2. APLICABILIDADE DAS FASES DO PROCESSO DE PDD

Eppinger e Ulrich [77] dividiram o processo de desenvolvimento de produto em seis fases: planeamento, desenvolvimento de conceitos, design ao nível do sistema, design ao nível do detalhe, testes e refinamento, e *ramp-up* de produção. Cada fase é composta por algumas etapas (ver Figura 3.1).

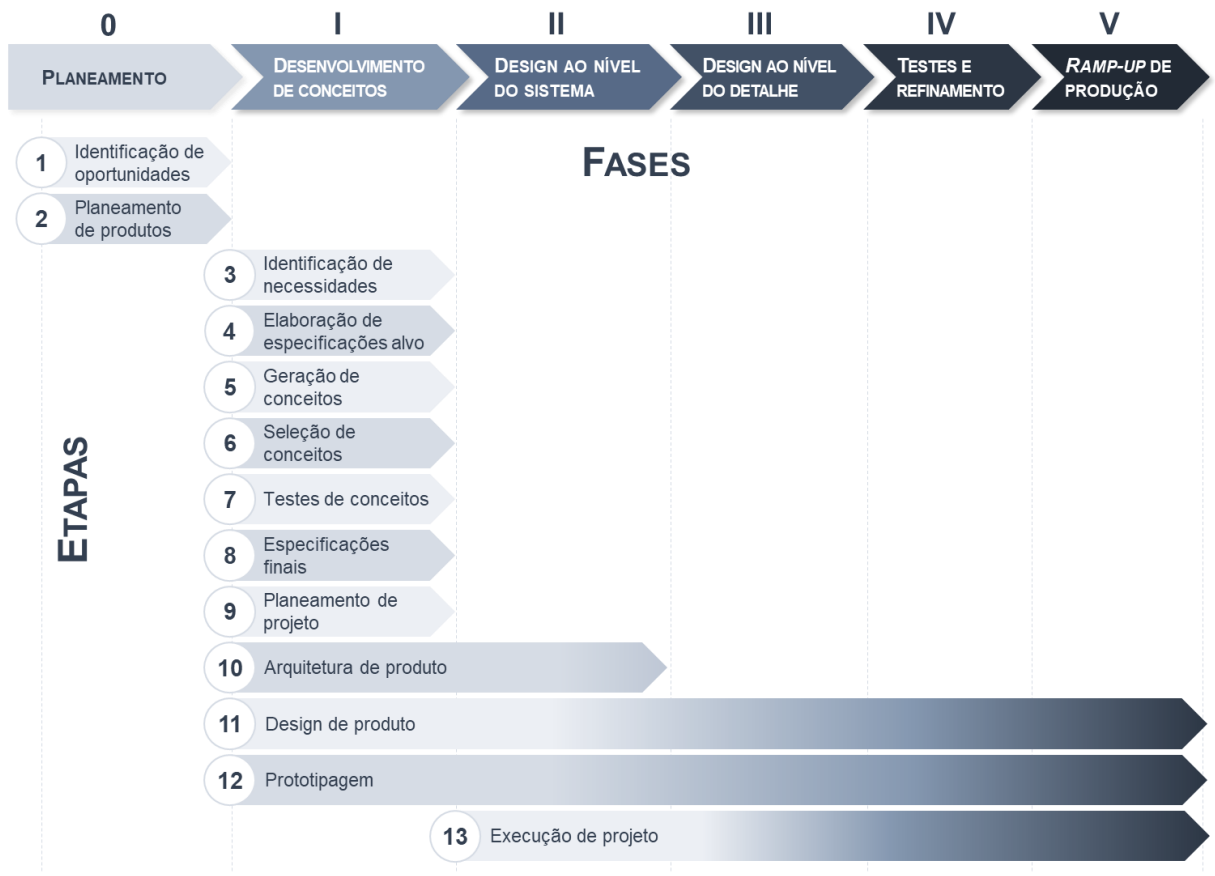


Figura 3.1 – Lógica da sequência das 6 fases e 13 etapas de PDD, adaptado de [77].

No livro encontra-se um esquema semelhante a este, mas em vez de estarem desenhadas caixas com os títulos das etapas, estão caixas com os títulos dos vários capítulos do livro. Porém, como nesta dissertação se pretende formular uma metodologia sequencial (ainda que iterativa), faz sentido apresentá-la aqui sobre a forma de etapas, em vez de capítulos. Após uma leitura crítica, decidiu-se aplicar duas adaptações à estrutura proposta. Devido ao facto de o desenvolvimento de CPS se concentrar essencialmente no design para implementação no contexto real de produção e consoante o BM, os capítulos mais importantes são o “design para fabrico” (redução de custos e melhoria de qualidade) e o “design robusto” (criação de produtos e processos que funcionam adequadamente na presença de ruídos). Os dois restantes “design industrial” (melhorias ergonómicas e estéticas) e “design para o ambiente” (redução do impacto ambiental) provavelmente não serão prioridade do desenvolvimento, mas também são relevantes. Por isso, foi criada a Etapa 11 “design de produto”, que agrupa estes quatro designs numa só etapa. A fim de formular uma sequência lógica de etapas entre as várias fases, foi necessário separar o capítulo de gestão de projetos nas etapas “planeamento de projeto” (Etapa 9) e “execução de projeto” (Etapa 13). Isto porque o planeamento e a execução de projeto são desempenhadas em momentos separados, tal como sugerem Eppinger e Ulrich [77]. Nota: os capítulos do livro de PDD [77]: “Patentes e propriedade intelectual” e “Economia de desenvolvimento de produto”. não

foram diretamente abordados com a elaboração de etapas por não serem tópicos incluídos no âmbito da presente tese.

Nos subcapítulos 3.2.1 a 3.2.6 são apresentadas as fases do processo de desenvolvimento de produto genérico a par de análises de aplicabilidade ao desenvolvimento de CPS. Ou seja, o primeiro parágrafo de cada subcapítulo consiste em informação sobre o design e desenvolvimento de produto genérico, retirada do livro [77]. Foi elaborado um resumo que descreve a lógica da fase e os seus resultados (*outputs*). Estas transcrições de texto do livro foram feitas de forma direta, mas consoante um critério de relevância da informação para esta dissertação. Depois, no segundo parágrafo, é apresentada a respetiva análise de aplicabilidade, sendo analisado de que forma é que a descrição lógica e os *outputs* da fase de desenvolvimento de produto genérico é aplicável ao desenvolvimento de CPS. Cada fase é composta por etapas (Figura 3.1), e são as etapas que concretizam a respetiva fase. Logo, as secções 3.2.1 a 3.2.6 são como que introduções às respetivas Etapas, enquadrando-as no processo.

### **3.2.1. FASE 0 – PLANEAMENTO**

A fase de planeamento é a fase “zero” porque precede a aprovação do projeto e o lançamento do processo de desenvolvimento. Inicia-se com a identificação de oportunidades (Etapa 1), guiada pela estratégia corporativa, e inclui avaliações dos desenvolvimentos tecnológicos recentes e aferições dos objetivos de mercado. O principal *output* desta fase é a declaração de missão do produto, que consiste num guia para o desenvolvimento de produto (explicado em maior detalhe na Etapa 2). Adicionalmente, é elaborado um plano de etapas, alocando recursos<sup>3</sup> para o efeito [77].

**Análise de aplicabilidade:** partindo do BM existente, que tem necessidades de interação com o mercado fixas e estabelecidas, a fase inicial do desenvolvimento de CPS deve consistir na identificação e compreensão dessas necessidades (e oportunidades) do BM (Etapa 1) e no Planeamento da estratégia de desenvolvimento (Etapa 2). O objetivo do projeto de desenvolvimento de CPS é desenvolver um CPS que ofereça soluções que satisfaçam melhor as necessidades processuais e operacionais da criação de valor para essas oportunidades de negócio que um sistema produtivo e operacional tradicional. Para isso, primeiro é necessário articular essas oportunidades e elaborar uma estratégia. Este conjunto de informações formula a declaração de missão do projeto, que inclui o guia do desenvolvimento de CPS (mais detalhe no subcapítulo 3.3.2) e deve ir de encontro à lógica macro de satisfazer os requisitos do BM.

### **3.2.2. FASE I – DESENVOLVIMENTO DE CONCEITOS**

Nesta fase, as necessidades do mercado-alvo são identificadas (Etapa 3), conceitos alternativos de produto são gerados e avaliados (Etapas 4 e 5), e um ou mais conceitos são selecionados para desenvolvimento e testes adicionais (Etapa 6). Geralmente, um conceito é acompanhado por um conjunto de especificações, esboçadas preliminarmente na Etapa 4 e definidas finalmente na Etapa 8, uma análise de produtos competitivos e uma justificação económica. É importante que estas etapas sejam desempenhadas de forma iterativa e a par e passo. Por exemplo, depois de ter sido elaborada uma primeira lista de necessidades e de conceitos, durante os respetivos testes o mais provável é que surjam mais questões e se identifiquem mais necessidades dos clientes. Estas novas informações devem

---

<sup>3</sup> O termo “recurso” refere-se ao tangível e ao intangível, i.e. capacidades e competências essenciais, vantagens competitivas e recursos humanos, materiais ou capitais [77].

ser incrementadas nas primeiras listas. É nesta fase que se inicia também o desenvolvimento de conceitos relativos à arquitetura, ao design e à prototipagem (Etapas 10, 11 e 12) e a elaboração do planejamento de projeto (Etapa 9) [77].

**Análise de aplicabilidade:** depois de estar formulada a Declaração de Missão (Etapa 2) e delineado um planejamento de desenvolvimento de CPS, nas etapas seguintes a equipa concentra-se no desenvolvimento de conceitos de CPS que atendam as oportunidades articuladas na declaração de missão e respeitem as condições impostas. Na Etapa 3, investiga-se e documenta-se toda a informação sobre as necessidades de todos os intervenientes da VC, desde o cliente, ao operador de fábrica, aos fornecedores, aos supervisores, etc. Este estudo deve resultar no mapeamento de todas as necessidades de negócio, processuais e operacionais. As necessidades devem ser organizadas hierarquicamente e organizadas em blocos de acordo com a geografia e funcionalidade. Tendo estudado todo o negócio existente e tendo em mão o mapeamento detalhado das necessidades do mesmo, o passo seguinte consiste em elaborar objetivos de especificações concretos ainda que amplos, relativamente às necessidades do negócio (e.g. especificação de produtividade). Geram-se então conceitos-solução, dentro dos níveis alvo de satisfação das necessidades. As Etapas 5 e 10 (“geração de conceitos de CPS” e “definição conceptual da arquitetura de CPS”) são iniciadas nesta fase, com a identificação e organização de componentes e funcionalidades de CPS (Figura 2.6), e a esquematização dos mesmos. Depois de estruturar conceitos relativos ao modelo conceptual das funcionalidades de cada bloco e de cada interface, na transição para o design ao nível do sistema (Fase II), deve-se definir especificações finais para guiar mais concretamente essas fases (Etapa 8). O carácter iterativo interetapas também se aplica analogamente à Fase I de desenvolvimento de CPS.

### **3.2.3. FASE II – DESIGN AO NÍVEL DO SISTEMA**

Esta fase concretiza-se na Etapa 10, onde é elaborada a definição e o design da arquitetura do produto e a decomposição do produto em subsistemas e componentes, e na Etapa 11 onde se faz o design preliminar dos principais componentes. Os planos iniciais para o sistema de produção e montagem final também são geralmente definidos durante esta Fase II (Etapa 11).

**Análise de aplicabilidade:** por se tratar de um sistema de sistemas, o design de CPS ao nível do sistema inclui, de igual modo, a definição e o design da arquitetura do CPS geral, dos seus subsistemas, e dos blocos comuns aos vários subsistemas. Para isso são definidos os diferentes blocos funcionais e físicos de cada subsistema e das interfaces entre eles (ver mais detalhe na Etapa 10). Elaboram-se também as primeiras alternativas de arquitetura das tecnologias do CPS. Na Fase II iniciam-se ainda os designs preliminares para os subsistemas e blocos principais.

### **3.2.4. FASE III – DESIGN AO NÍVEL DO DETALHE**

Fase que inclui a Etapa 11 onde é detalhada especificação completa da geometria, materiais e tolerâncias de todas as peças exclusivas do produto e a identificação de todas as peças standard a serem adquiridas. Um plano de processo é estabelecido e as ferramentas são projetadas para cada peça a ser fabricada no sistema de produção. Destacam-se três passos críticos que são a seleção de materiais, o custo de produção e a performance robusta. Estes três passos são melhor considerados ao longo de todas as fases, porém só são finalizados na Fase III.

**Análise de aplicabilidade:** depois de se ter elaborado o design ao nível do sistema, onde a arquitetura, a lógica e o *layout* das várias tecnologias estão bem estabelecidos, identifica-se os detalhes

e requisitos de cada componente e interface, de cada bloco e de cada subsistema de blocos. É nesta fase que se define concretamente como é que o CPS em cada unidade, célula, posto ou linha de fabrico irá ser concretizado e construído ao detalhe. Aqui deve-se elaborar a lista detalhada de materiais e componentes de CPS, de aquisição interna ou externa, componentes standard ou não standard. Deve-se pensar ao detalhe quais os componentes e funcionalidades que irão ser necessários, onde, quando e de que modo. Por último, é também nesta fase que se elabora o design do CPS para ter um performance que seja robusta (com os requisitos do CPS, ver Tabela 2.12).

### **3.2.5. FASE IV – TESTES E REFINAMENTO**

Fase que envolve a construção e avaliação de várias versões de pré-produção do produto. Os vários tipos de protótipos descritos na Etapa 12 são utilizados. O objetivo é testar se o produto funcionará como projetado e se este atende às principais necessidades do cliente. Os protótipos mais complexos (beta) são extensivamente avaliados e testados pelos clientes em ambiente de uso real, a fim de responder a perguntas sobre desempenho e confiabilidade, com vista à identificação das alterações de engenharia necessárias para o produto final. Além disso, os protótipos beta são normalmente fabricados através dos meios de produção finais ou quase finais.

**Análise de aplicabilidade:** depois de o design do todo e das partes do CPS estiver elaborado, a fase seguinte consiste em testar as soluções e decisões através da simulação de protótipos virtuais e, se possível, da construção de protótipos reais e físicos parciais ou mesmo locais para as operações críticas. Para auxiliar esta fase, as várias medidas de ação descritas na Etapa 12 “prototipagem” podem ser muito úteis. Os protótipos virtuais podem ajudar na análise flexível de várias alternativas tecnológicas de componentes CPS para cada célula, posto, ou máquina. Pode-se mesmo pensar até ao nível do elemento de trabalho<sup>4</sup>. Pode fazer sentido construir protótipos físicos simples que ao serem testados deem certeza à equipa de que aquela solução elementar funciona (e.g. teste de atuadores). Os protótipos construídos em ITC, que podem envolver vários Conceitos Tecnológicos como os MES, a *Cloud*, ou a eVC (ver Tabela 2.3), e que foram aprovados nas simulações e testes feitos nesta Fase, são usados no CPS final.

### **3.2.6. FASE V – RAMP-UP DE PRODUÇÃO**

Na fase de arranque da produção, o produto é fabricado usando o sistema de produção pretendido. O objetivo do *ramp-up* é treinar a *workforce* e resolver quaisquer problemas remanescentes nos processos de produção. Os produtos produzidos durante o *ramp-up* da produção por vezes são entregues aos clientes preferenciais e são cuidadosamente avaliados para identificar as falhas restantes. A transição do *ramp-up* da produção para a produção em andamento é geralmente gradual. A certo momento dessa transição, o produto é lançado e fica disponível para ampla distribuição. Uma revisão do projeto pós-lançamento pode ocorrer logo após o lançamento. Esta revisão inclui uma avaliação do projeto sob as perspetivas comercial e técnica e tem como objetivo identificar formas de melhorar o processo de desenvolvimento de projetos futuros.

**Análise de aplicabilidade:** depois de as soluções computacionais terem sido testadas e simuladas, e após se ter algum grau de certeza de qual o *hardware* e *software* certo para cada posto de produção, inicia-se a implementação e construção real do CPS. A quinta fase do desenvolvimento do

---

<sup>4</sup> Os elementos de trabalho são as etapas distintas necessárias para concluir um ciclo numa estação de trabalho. Um elemento de trabalho é o menor incremento de trabalho que pode ser alocado a outro operador [91].

CPS difere da genérica, apesar da generalidade da informação acima ter aplicabilidade. Ou seja, a Fase V de CPSDD deve intitular-se “ramp-up de implementação e utilização do CPS” e deve iniciar-se com a obtenção de todos os componentes necessários para o CPS. À medida que se for construindo os diferentes blocos e subsistemas, devem ser realizados testes de qualidade, pelo que a Fase IV (testes) deve ser iterada muitas vezes. Utiliza-se os meios computacionais que já tinham sido desenvolvidos em IV, e desenvolvem-se ainda mais. À medida que as implementações forem concluídas, deve-se averiguar cautelosamente se tudo está a funcionar como pretendido. Depois, deve-se realizar sessões de formação aos colaboradores que irão utilizar as funcionalidades e interagir com os componentes. Os primeiros produtos fabricados com o CPS em funcionamento deverão ser testados e avaliada a sua qualidade, tal como está descrito acima. Adicionalmente, deve ser testada a capacidade de planeamento e controlo de operações, assim como a do sistema produtivo. Finalmente, a realização de uma avaliação geral do projeto de desenvolvimento é de igual modo recomendável.

### **3.3. APLICABILIDADE DAS ETAPAS DO PROCESSO DE PDD**

De forma similar ao subcapítulo anterior, neste subcapítulo são apresentados os resultados da análise de aplicabilidade das etapas de PDD [77] ao cenário de CPSDD.

#### **3.3.1. ETAPA 1 – IDENTIFICAÇÃO DE OPORTUNIDADES**

Uma oportunidade é uma ideia para um novo produto, uma descrição do produto em forma embrionária, ou uma correspondência aproximada entre uma necessidade e possíveis soluções. O objetivo desta etapa é esmiuçar quais as janelas de ação e as direções do desenvolvimento que justificam um investimento mais considerável dos recursos da empresa. Partindo da definição do âmbito geral da inovação, procede-se à geração e captação de várias oportunidades. Depois, é efetuada uma triagem, resultando numa lista mais curta de oportunidades promissoras, que são depois mais refinadas e desenvolvidas. Finalmente, são selecionadas apenas as oportunidades excecionais. Os principais *outputs* são: lista com algumas oportunidades finais; documentos com detalhe das oportunidades [77].

**Análise de aplicabilidade:** o projeto conceptual de CPSDD deve iniciar-se com a identificação e compreensão das oportunidades (necessidades) do BM, fixas e pré-estabelecidas pela empresa, que melhor podem ser satisfeitas por soluções de CPS. Os passos descritos acima devem ser adaptados e seguidos, a fim de maximizar a qualidade desta articulação de oportunidades. Primeiramente, o BM deve ser analisado e compreendido. Deve-se procurar respostas sobre o negócio, nomeadamente: *o quê?* (qual a proposta de valor), *como?* (que infraestrutura, etapas, recursos e parcerias), *para quem?* (quais os segmentos de clientes, canais de marketing e distribuição), e *quanto?* (quais as estruturas de custos e fluxos de receitas) [78]. O objetivo é elaborar uma reflexão de alto nível do valor que a organização pretende gerar, que problemas a resolver surgem dessa criação de valor, tanto a nível de processo produtivo como de operações. Depois, as oportunidades do BM devem ser identificadas, articuladas e planificadas, de uma forma geral não muito detalhada, elaborando um conjunto de declarações de oportunidades do BM. Nesta Etapa 1, pode-se iniciar já a organização hierárquica das oportunidades, ainda que estas sistematizações sejam mais próprias da Etapa 3. Na Etapa 1 pretende-se apenas a definição das janelas de ação de desenvolvimento, e não um estudo altamente detalhado das necessidades do BM. Após a articulação, é feita uma triagem das oportunidades, que envolve a avaliação da importância e da dificuldade de desenvolvimento de cada uma, chegando-se a um leque de

oportunidades finais que são levadas para a Etapa 2. Ainda antes de terminar a Etapa 1, as oportunidades finais podem ser refinadas, adicionando-se mais ideias e ramificações. Todos os *outputs* têm aplicabilidade, por ser importante para a empresa que se chegue a uma lista de oportunidades do BM que vão ser alavancadas pelo CPS a ser desenvolvido. Isto porque só será possível dar início à Etapa 3 depois de estarem definidos os contextos em foco (janelas de ação) onde se vai desempenhar a identificação de necessidades. Um exemplo de uma declaração de oportunidade, que faria parte da proposição de valor de um BM é: “Capacidade de o cliente monitorizar o estado de produção do produto encomendado”.

### 3.3.2. ETAPA 2 – PLANEAMENTO DE PRODUTOS

Partindo das oportunidades identificadas na Etapa 1, são avaliados e priorizados os projetos que resultam de cada oportunidade (ou conjunto de oportunidades), de acordo com a estratégia competitiva da organização e segundo duas dimensões: impacto (benefícios) e dificuldade (de desenvolvimento e implementação). Elabora-se assim um portefólio com alguns projetos-oportunidade prioritários, onde consta a informação obtida na Etapa 1. Depois, aloca-se recursos e planeia-se os *timings*, a sequência de projetos e a introdução dos produtos no mercado. Finalmente, é realizado o planeamento de pré-projeto, de onde resulta a declaração de missão do projeto – guia para o desenvolvimento que inclui: uma breve descrição do produto, a proposta de benefício, os objetivos chave do negócio, os mercados alvo para o produto, restrições, pressupostos, e partes interessadas (*stakeholders*). Um bom desempenho nestes passos permite evitar: a cobertura inadequada dos mercados-alvo com produtos competitivos; a introdução de produtos no mercado no momento errado; a incompatibilidade entre a capacidade agregada de desenvolvimento e o número de projetos alavancados; má distribuição de recursos, com alguns projetos com excesso de pessoal e outros com falta; início e subsequente cancelamento de projetos mal concebidos; e desperdícios de recursos devido às mudanças frequentes nas direções e âmbito dos projetos [77].

**Análise de aplicabilidade:** após a formulação de declarações de oportunidades do BM, é vantajoso avaliar o potencial dos benefícios que o CPS pode alavancar nas diferentes vertentes do negócio. Essa avaliação pode ser feita consoante o impacto (benefícios para o negócio) face à sua dificuldade de desenvolvimento e implementação. Ou seja, deve agora ser analisado por alto que medidas de ação dos níveis 8C (Figura 2.6, Tabela 2.8 e Tabela 2.9) devem ser necessariamente abordadas e desenvolvidas mediante as necessidades do negócio. Por exemplo, pode só fazer sentido chegar até ao nível I (Conexão), e dentro deste nível pode não ser necessário aplicar todas as medidas de ação. Assim, é permitida uma melhor priorização das potenciais vertentes de desenvolvimento. O processo de desenvolvimento dos vários projetos deve ser depois planeado, alocando pessoas na sequência de etapas e passos, a fim de evitar faltas de *staff*, incumprimento de prazos, ou o não alcance dos níveis de qualidade requeridos. No planeamento de pré-projeto de CPS, elabora-se a declaração de missão que é um guia para o desenvolvimento similar. Inclui: uma breve descrição do CPS e de cada uma das suas partes; a proposta de benefício geral e particular de cada parte descrita; os “mercados alvo” neste caso são os contextos alvo da VC do BM em questão que serão alvos beneficiados pelas capacidades do CPS, que podem ser processos ou atividades; os *stakeholders* são os participantes nos contextos alvo,

que possuem necessidades (Etapa 3) e ao fim ao cabo serão utilizadores<sup>5</sup> do CPS.

### 3.3.3. ETAPA 3 – IDENTIFICAÇÃO DE NECESSIDADES

“Necessidade” é a palavra escolhida para rotular quaisquer atributos de um potencial produto que é desejado pelo cliente, não havendo a distinção entre desejo e necessidade. A etapa inicia-se com a recolha de dados brutos dos clientes, que são depois minuciosamente interpretados. Seguidamente, as necessidades são organizadas numa hierarquia de necessidades primárias e secundárias (e terciárias, se se justificar). Finalmente, é estabelecida a importância relativa das necessidades. Assim, esta etapa tem os seguintes objetivos: garantir que o produto está focado nas necessidades do cliente; identificar necessidades latentes ou ocultas; elaborar uma base de factos para justificar as especificações do produto; e garantir que nenhuma necessidade crítica é perdida ou esquecida. Os autores [77] defendem a premissa base de que quem controla diretamente os detalhes do produto, incluindo engenheiros e designers industriais, deve interagir com os clientes e experimentar o ambiente de uso do produto. Alguns *outputs* adicionais desta etapa incluem: relatórios de entrevistas realizadas a potenciais clientes dos mercados alvo e aos vários *stakeholders*, que são todas as entidades afetadas pelo sucesso ou fracasso do produto; registos audiovisuais de entrevistas ou observações do produto em uso; matriz de seleção de clientes, para planear a exploração de todo o espectro de mercados alvo e toda a variedade de utilizadores (principais, normais e extremos); formulários de declaração de cada necessidade; e classificação final de necessidades por ordem de importância [77].

**Análise de aplicabilidade:** no projeto conceptual de DDCPS, “necessidade” refere-se aos atributos de um potencial CPS que é necessitado pelo BM da organização. Por exemplo, uma empresa pode ter a necessidade de “ter a capacidade de adaptação rápida do processo de produção, aquando às exigências inesperadas de um pedido do cliente”. Ou seja, o negócio tem essa “necessidade”. Ora, um negócio concretiza-se através de uma VC e, portanto, nesta etapa procura-se identificar as necessidades de todas as atividades e de todos os participantes nessa cadeia que possam suscitar atributos que o CPS deva possuir. Desde o cliente ao utilizador do próprio CPS, ao fornecedor, ao operador logístico, ao supervisor da fábrica, ao controlador de gestão, entre muitos outros, podem desempenhar tarefas que suscitam necessidades que podem ser resolvidas através do CPS, fazendo com que o CPS melhore a performance nessa parcela da VC. No entanto, tem de haver aqui uma clara distinção entre necessidade e desejo, porque um desejo de um colaborador pode não ser justificável e crucial, e só as necessidades críticas deverão merecer maior atenção. As necessidades latentes ou ocultas são aquelas que um operador ou engenheiro, ou mesmo o seu líder, não sabe que tem, mas que ao observar os seus comportamentos a utilizar uma ferramenta, ou a transportar algo, ou reagir a um problema individualmente, se identifica que por exemplo existe a necessidade de poder contactar de imediato com o chefe de operação. É nesta etapa que se deve mapear todo o processo produtivo, obter um retrato do *layout* da fábrica, e todas as operações necessárias para o correto funcionamento do negócio, numa organização hierárquica. As necessidades podem também ser organizadas consoante o local geográfico do problema. A fim de obter esse mapeamento completo e detalhado de todas as necessidades que possam resultar em atributos necessários ao CPS, os passos da Etapa 3 de PDD [77] devem ser adaptados e seguidos, considerando a premissa de que quem controla diretamente os detalhes do

---

<sup>5</sup> Os “utilizadores” de um CPS podem ser internos ou externos à organização e podem categorizar-se em colaboradores (operador, engenheiro, supervisor, gerente etc.), parceiros (fornecedor, operador logístico, etc.) e clientes.

CPS a ser desenvolvido, não só deve interagir com os responsáveis e utilizadores do sistema de produção como deve experienciar o contexto real de utilização. O próprio cliente pode ser “utilizador” do CPS, imagine-se o exemplo de este exigir que se comunique informações sobre a encomenda de duas em duas horas, ou três vezes ao dia, ou a qualquer momento. Este facto irá mais tarde ditar o modo funcional de como o CPS possibilita essa notificação, se é de modo automático ou não, se faz sentido ser através de uma aplicação de *smartphone* ou através de um e-mail, por exemplo. Em suma, todos os *outputs* referidos são, portanto, úteis para recolher, dissecar e documentar todas as necessidades, críticas ou não, garantindo que todo o espectro de necessidades do processo produtivo é aprofundado. Assim, um desempenho adequado nesta etapa pode garantir que o CPS está focado nas necessidades do BM. As declarações de necessidade são formulários que explicitam formalmente a necessidade, e.g. “Necessidade de automatização desta tarefa repetitiva, pelas seguintes razões (...)” e essas razões são sustentadas pelos registos de interpretação de dados brutos e análises dos mesmos.

### 3.3.4. ETAPA 4 – ELABORAÇÃO DAS ESPECIFICAÇÕES ALVO

Apesar de serem essenciais, as declarações de necessidades não são suficientes para guiar o design e a engenharia do produto. Por esta razão, estabelece-se um conjunto de especificações que explicitam o que o produto deve fazer através de detalhes precisos e mensuráveis. Desse modo, as especificações de um produto selam um acordo inequívoco sobre o que a equipa tentará alcançar para satisfazer as necessidades do cliente. Uma especificação (singular) consiste numa métrica e num valor, e.g. “tempo médio de montagem” é uma métrica, enquanto que “menos de 75 s” é o valor dessa métrica. As especificações de um produto são simplesmente um conjunto de especificações individuais. Para produtos altamente tecnológicos, as especificações devem ser estabelecidas pelo menos duas vezes (Etapas 4 e 8). Ora, imediatamente após chegar a uma lista final de necessidades do cliente, primeiro prepara-se uma lista de métricas. Depois, elabora-se uma tabela de *benchmarking* com os produtos competitivos, baseado na perceção da satisfação das necessidades dos clientes, e consoante as métricas listadas. Finalmente, para cada métrica, com base nas necessidades reais e tendo referência no *benchmarking*, estabelece-se um valor alvo ideal e outro marginalmente aceite. Assim, estas especificações representam as esperanças e aspirações da equipa e descrevem um produto que a equipa acredita que irá ter sucesso no mercado. Porém são metas estabelecidas antes de se saberem os constrangimentos que irão aparecer nas etapas seguintes e o mais provável é que muitas especificações não sejam atingidas, e outras sejam excedidas. Uma vez definidas estas metas, a equipa pode mais facilmente prosseguir com a geração de conceitos de solução. Isto porque as especificações alvo podem ser usadas para ajudar a equipa a seleccionar um conceito e a perceber quando é que um conceito é comercialmente viável. É por estas razões que as especificações devem ser acertadas depois da seleção e teste de conceitos (Etapa 8) [77].

**Análise de aplicabilidade:** analogamente, as declarações de necessidades de CPS resultantes da Etapa 3 são genéricas, e faltam mais diretrizes para guiar o desenvolvimento do CPS. Esta etapa tem potencial de aplicabilidade no projeto conceptual de CPSDD, apesar de a sua lógica ser mais de nível qualitativo, onde as métricas são dimensões de satisfação de necessidades, ou mesmo níveis de satisfação. Por exemplo, a métrica “Nível de tratamento e otimização da informação” poderá ter níveis de satisfação diferentes, entre os quais “ideal” que pode corresponder à “compatibilidade efetiva entre aplicativos, sistemas e tipos de dados; enriquecimento da informação através de combinações de fontes diversas; encriptação”. As atividades de estudo de boas práticas de CPS (*benchmarking*) podem



ser úteis para definir os intervalos de níveis de satisfação. Isto porque ao pesquisar externamente as piores e melhores práticas existentes relativamente a um certo nível de satisfação, pode ser mais fácil estabelecer intervalos qualitativos. Após a geração de conceitos e definição conceptual de arquiteturas alternativas de CPS, as métricas e níveis de satisfação estabelecidos previamente devem ser revistos, para confirmar se os alvos foram atingidos, ou se alguma “saída” dos intervalos é justificada pelo aprofundamento de conhecimentos da organização e das suas necessidades.

### **3.3.5. ETAPA 5 – GERAÇÃO DE CONCEITOS**

Um conceito de produto é uma descrição aproximada da tecnologia, princípios de funcionamento e forma do produto. É uma descrição concisa de como o produto atenderá às necessidades do cliente, que leva em consideração o intervalo de especificações-alvo, estabelecido na etapa anterior. Usualmente, é expresso através de um esboço ou um modelo tridimensional aproximado e é muitas vezes complementado por uma breve descrição textual. O grau segundo o qual o produto satisfaz os clientes e pode ser comercializado com sucesso, depende em grande parte da qualidade do conceito subjacente. Um bom conceito pode suportar fracas implementações, mas um mau conceito raramente pode ser manipulado para obter sucesso comercial. Uma excelente geração de conceitos garante à equipa de desenvolvimento que todo o leque de alternativas foi explorado e reduz bastante a probabilidade de se encontrar um conceito superior no final do processo. A etapa inicia-se com a clarificação do problema em causa, que consiste na decomposição do mesmo em subproblemas consoante as funções do produto, ou as ações do utilizador, e geralmente desenham-se diagramas de funções. Depois, é elaborada uma pesquisa de conceitos em fontes externas, que resultam em: relatórios de entrevistas com os utilizadores principais<sup>6</sup> e especialistas<sup>7</sup>; relatórios de produtos existentes no mercado com conceitos interessantes, encontrados na internet ou em catálogos de empresas, por exemplo; e listas de patentes úteis. A par desta pesquisa, desenvolve-se outra, que consiste um trabalho interno de geração de conceitos. Resulta em documentos de registo do *brainstorming* de ideias, da exploração de todo o espaço de soluções, ideias viáveis e inviáveis, incluindo esboços em papel e ficheiros de computador, e também relatórios de reuniões e *Focus Groups*<sup>8</sup>. Finalmente, os conceitos são explorados sistematicamente, através da elaboração de árvores de classificação de conceitos, com várias classes, incluindo registos das comparações entre conceitos e “podas” dos ramos de conceitos sem racional por de trás. A par da árvore, as tabelas de combinação de fragmentos de solução de vários produtos diferentes também demonstram ser uma ferramenta útil. Todas estas sistematizações devem ser documentadas, juntamente com todos os detalhes, bons e menos bons. Concluindo, é importante sublinhar que os métodos e ferramentas de geração, seleção e teste de conceitos devem ser utilizados também nas etapas de definição da arquitetura e de design do produto [77].

**Análise de aplicabilidade:** após a identificação e documentação sistemática das necessidades de produção e operações da empresa cuja performance possa ser melhorada por atributos de um CPS, é fundamental concentrar esforços na geração de conceitos de CPS que possam solucionar essas necessidades. Do mesmo modo, a qualidade do CPS depende do desempenho da equipa de desenvolvimento nesta etapa. Por agora, o objetivo é chegar a modelos conceptuais, e não concretizar já

---

<sup>6</sup> Utilizadores principais, traduzido do inglês “*lead users*”, são pessoas ou conjuntos de pessoas (empresas) com necessidades avançadas que podem não ser atendidas pelos produtos ou serviços existentes [77].

<sup>7</sup> Especialistas incluem e.g. profissionais, consultores, docentes universitários e representantes técnicos dos fornecedores [77].

<sup>8</sup> Uma reunião de *Focus Group* consiste em conversas entre vários potenciais clientes e um moderador [77].

com as tecnologias com o modelo X da marca Y. Tendo mapeado e sistematizado a hierarquia de necessidades do sistema e dos seus subsistemas, procura-se agora descrições aproximadas dos princípios de funcionamento, formas e possíveis tecnologias para cada subsistema ou bloco de funcionalidade e de componentes do CPS. Daí ser importante que o mapeamento das necessidades em hierarquias esteja suficientemente detalhado, para garantir que as soluções a um nível micro (ao nível do componente ou dispositivo, ainda que sem especificar o detalhe) sejam coerentes com as dos níveis macro (subsistemas e sistema geral). É importante garantir que todas as alternativas de soluções foram consideradas, porque só assim se pode chegar às mais interessantes, possibilitando uma minimização do custo e maximização do desempenho na satisfação das necessidades (explorado em maior detalhe no Design para fabrico, subcapítulo 3.3.11.3). Assim, os passos descritos acima devem ser seguidos. Ambas as pesquisas, interna e externa, devem ser executadas para chegar aos melhores conceitos. Devem ser consultados catálogos de dispositivos, máquinas, softwares, etc., que permitam obter a informação conceptual das funcionalidades e modos de operação. Pode ser relevante para a equipa de desenvolvimento contactar empresas que tenham desenvolvido soluções para processos semelhantes, apesar de que, provavelmente seja difícil disporem informação por motivos de exclusividade. Recorrer à ajuda de firmas de consultoria especialistas em aspetos particulares pode acelerar o processo, porque podem ser detentores de informação privilegiada. O trabalho interno de *brainstorming* poderá ser o mais relevante, no sentido em que são os futuros utilizadores do CPS e especialistas do processo quem sabe o que precisam e, portanto, podem ter um importante voto na matéria. O objetivo é chegar a algumas soluções de sistematização holística das funções que o CPS deve desempenhar e, por outro lado, qual a lógica das ações de utilização prática. Para este efeito, é útil trabalhar nos *outputs* de fragmentos de solução referidos em PDD [77], nomeadamente as árvores de sistematização e as tabelas de combinações. Só assim se conseguirá esmiuçar todas as alternativas. Para conseguir dissecar tudo isto, é provável ter que se iterar a Etapa 3, porque podem surgir mais dúvidas sobre as necessidades dos utilizadores.

### 3.3.6. ETAPA 6 – SELEÇÃO DE CONCEITOS

A seleção de conceitos-solução para um produto é o processo iterativo de avaliar, comparar, aprimorar e selecionar conceitos. A etapa inicia-se com a preparação da matriz de seleção, onde se colocam os critérios de seleção num eixo e os vários conceitos em comparação no outro. É escolhido um conceito de referência que serve de base para as avaliações dos restantes conceitos. Depois, cada conceito é avaliado recebendo uma pontuação. Concluídas as avaliações, é calculada a classificação final de cada um. O grau de complexidade desta matriz, i.e. o tipo de *scoring*, a quantidade de critérios e a forma de comparação, deve ser tanto mais elevado quanto maior for o grau de importância da questão em causa, e maior for a quantidade de conceitos e critérios. Destes primeiros passos resulta uma redução do número de conceitos, mas os conceitos “podados” devem ser “concertados” e aprimorados, através de combinações com outros conceitos, para que, ao serem incluídos na iteração seguinte, não se percam fragmentos-solução que possam ser cruciais. Finalmente, é selecionado um ou mais conceitos posicionados no topo da classificação, e que foram aprimorados com fragmentos dos restantes conceitos [77].

**Análise de aplicabilidade:** após a geração de conceitos, a equipa de desenvolvimento do CPS terá em mãos vários documentos diferentes que descrevem caminhos conceptuais alternativos para satisfazer as necessidades do sistema produtivo e operativo existente, do BM em causa. Por exemplo,

se existe um conjunto de algumas necessidades como a de uma rastreabilidade precisa de peças de componentes e atividades de montagem para monitorizar a posição de ferramentas, a equipa deve neste momento ter formulado e detalhado modelos conceptuais diferentes de CPS, cada um com diferentes Componentes e Funcionalidades (ver Figura 2.6). Um deles poderia apostar num MES mais robusto, mas que necessita também de maior investimento. Outro poderia apostar num MES mais simples mas com menos funcionalidades. As diferentes alternativas devem ser avaliadas, comparando-as com a solução de referência que deve ser a que tem o MES que responde melhor a todos os critérios de avaliação, mas que pode não corresponder à solução mais barata e adequada. Assim, os diferentes passos descritos acima têm utilidade para a seleção de conceitos de CPS, porque faz sentido que se compare e avalie as alternativas, a fim de se chegar a uma alternativa com o menor custo, mas que garanta as funcionalidades e o desempenho adequados e suficientes para satisfazer as necessidades críticas (numa fase inicial do projeto) ou importantes/normais (em iterações subseqüentes ao projeto).

### **3.3.7. ETAPA 7 – TESTES DE CONCEITOS**

Um teste de conceito consiste em solicitar comentários, opiniões e *feedback* sobre uma descrição de um conceito de produto. A solicitação dirige-se aos potenciais clientes no mercado-alvo. O objetivo é investigar quais dos conceitos devem ser adotados, enquanto se procura informações para os melhorar e estimar o potencial comercial do produto. Inicialmente, define-se o objetivo geral do teste. Depois, escolhe-se a população do *survey*, que deve ser representativa e abrangente do espectro de mercados alvo. Seguidamente, decide-se o formato e o meio comunicação do *survey* (reunião, telefone, email, internet, redes sociais, etc.). Procede-se, então, à comunicação do conceito, que deve ser suportada por material como documentos de esboços e esquemas, ficheiros multimedia, ou até protótipos. De facto, além da seleção, o teste de conceitos também está muito relacionado com a prototipagem (Etapa 12), isto porque ambos invariavelmente envolvem algum tipo de representação do conceito de produto, geralmente um protótipo. Depois de registado o *output* dos *surveys*, deve-se medir as respostas dos clientes. Um dos critérios usuais de medida é a intenção de compra. Finalmente, os resultados devem ser interpretados, e conclusões dos testes devem ser declaradas. Nota geral: pode-se optar por não realizar nenhum teste de conceito se o tempo requerido para o fazer for inviável, ou se o custo deste teste for desapropriado, comparado com o custo de lançamento do produto [77].

**Análise de aplicabilidade:** uma vez tendo sido selecionadas as alternativas de CPS com grande potencial para resolver um certo conjunto de requisitos do BM e necessidades da VC, é útil pedir *feedback* aos futuros utilizadores do CPS. Adicionalmente, pode ser elaborada uma análise investimento-benefício para as várias soluções alternativas. Tendo sido realizada uma análise conclusiva, responsáveis financeiros da Empresa A devem dar uma confirmação final relativa aos custos e à dimensão do investimento necessário. Só depois de se perguntar se a funcionalidade será útil, às pessoas indicadas, e de se obter um leque de opiniões completo e objetivo, será possível adquirir um nível de certeza superior – uma segurança de que o modelo conceptual final tem realmente funcionalidades indispensáveis para o CPS que a empresa necessita para melhor alavancar o negócio em questão. Assim, os passos descritos acima devem ser seguidos no teste de conceitos-CPS.

### **3.3.8. ETAPA 8 – DEFINIÇÃO DAS ESPECIFICAÇÕES FINAIS**

À medida que se finaliza a escolha de um conceito e se prepara para o design e desenvolvimento subseqüentes, as especificações são revisitadas. As especificações que originalmente eram apenas alvos expressos como amplos intervalos de valores, agora são acertadas e tornadas mais precisas. O

primeiro passo consiste em desenvolver modelos técnicos do produto. Estes modelos são ferramentas para prever os valores das métricas para um conjunto específico de decisões de design e podem também ser usados para prever o desempenho do produto em várias dimensões. “Modelo” refere-se a aproximações analíticas e físicas do produto. As entradas do modelo são variáveis (métricas) de projeto, independentes, e associadas ao conceito do produto (e.g. massa, diâmetro, propriedades do material). As saídas do modelo são os valores para cada métrica. São desenvolvidos vários modelos independentes, cada um correspondente a um subconjunto de métricas. Tendo concluído os modelos, seguidamente elaboram-se análises de previsão de viabilidade técnica dos conjuntos de especificações, explorando diferentes combinações de variáveis de projeto. A par destes passos, deve ser desenvolvido um modelo de custo do produto, incluindo o custo-alvo de fabrico, calculado a partir da lista de partes (materiais e peças). Esta lista inclui intervalos de estimativa de preço de compra ou custo de fabrico de cada parte. O terceiro passo consiste no refinamento iterativo dos modelos técnicos e modelos de custo, através das ferramentas de *trade-off*<sup>9</sup>, como os gráficos de mapeamento de produtos face a duas ou mais dimensões (como custo de fabrico e qualidade por exemplo), que ajuda a visualizar a posição relativa do produto em relação aos concorrentes. As análises conjuntas podem ser úteis, ao usar dados de surveys ao cliente para construir um modelo de preferência do cliente. Finalmente, deve-se dissecar hierarquicamente as especificações. Ou seja, partindo do nível macro inicial, deve-se procurar definir as especificações dos múltiplos subsistemas, respeitando as especificações do sistema geral. Nota geral: a maior dificuldade desta etapa está nos *trade-offs*, de quando há relações inversas entre duas especificações que são inerentes ao conceito de produto selecionado. Os *trade-offs* ocorrem frequentemente entre diferentes métricas de desempenho técnico e quase sempre entre as métricas de desempenho técnico e a variável do custo. A tarefa difícil ao refinar especificações é escolher como é que as compensações devem ser resolvidas [77].

**Análise de aplicabilidade:** os níveis de satisfação de necessidades para o CPS, estabelecidos na Etapa 4, devem ser trabalhados, agora que já se tem em mãos um conceito final de CPS que resolve os problemas do sistema produtivo necessitado pelo BM. Deve-se chegar a algum detalhe sobre quais as características objetivas do CPS em causa. Partindo do intervalo de especificação, a construção de Modelos Técnicos é bastante útil para mapear as entradas (variáveis) num bloco de funcionalidade de CPS e pensar nas saídas que são métricas com valores de especificação final. Por exemplo, se se estiver a projetar uma unidade de recolha e tratamento de dados, é necessário saber quais os processos a sensorizar, que dados recolher, quais as vias de recolha e transmissão de dados, qual o hardware de armazenamento de dados brutos, qual a taxa de recolha de dados, qual a capacidade de armazenamento. Estas são exemplos de variáveis do modelo técnico de “recolha e tratamento de dados”. As saídas seriam por exemplo, respetivamente: processo de estampagem e corte de chapa, máquinas A,B, ferramentas C,D; performance e ruído das máquinas, posição e desgaste das ferramentas, quantidade de matéria prima disponível; sensores L,K e MWSN X; *hard-drive* W; 300 MB/s; 100 GB. Estes Modelos Técnicos são muito úteis mais uma vez para a sistematização de informação que potencia mais criticismo sobre os conceitos obtidos até então. As análises de previsão de viabilidade técnica são úteis para saber de antemão, sem investir em protótipos ou implementações, se as especificações correspondem ao que o sistema produtivo realmente necessita e se são

---

<sup>9</sup> Segundo o dicionário de Cambridge [92], um *trade-off* é uma ação onde se equilibra e pondera entre duas situações ou qualidades opostas; uma situação em que se aceita algo menos bom para ter algo bom.

concretizáveis, quer a nível de investimento, quer a nível de implementação e operacionalização posteriores. Os modelos de custo são também de extrema importância para sustentar estas análises, e as suas listas de partes mais uma vez, fazem com que a equipa de desenvolvimento organize bem a informação que é preponderante mais à frente no desenvolvimento. É muito útil chegar a este passo com um grande suporte documental de modo a que se facilite a mitigação os dados menos favoráveis dos modelos técnicos e de custo (realização de *trade-offs*), analisando possíveis reduções de custos sem comprometer a performance do CPS. Elaborar estas análises simultaneamente à decomposição hierárquica das especificações, faz com que todas as ramificações de cada sistema sejam melhoradas. Assim, é possível “esculpir” cada vez mais a solução de CPS, a fim de chegar às melhores alternativas para satisfazer necessidades.

### **3.3.9. ETAPA 9 – PLANEAMENTO DE PROJETO**

Projetos de desenvolvimento bem-sucedidos resultam em produtos de alta qualidade e baixo custo, enquanto fazem uso eficiente do tempo, dinheiro e outros recursos. A gestão de projetos é a atividade de planejar e coordenar recursos e tarefas para atingir esses objetivos. O planeamento (Etapa 9), depende da execução (Etapa 13) de projeto e vice-versa. Desempenhar estas duas etapas a par e passo é o que se pode chamar de gestão de projeto. Ou seja, o plano de projeto é primeiramente configurado na fase um, mas é uma entidade dinâmica que evolui ao longo do processo de desenvolvimento, pelo que deve ser atualizado à medida que o projeto é executado nas fases seguintes. Apesar de esta ser a nona etapa, não significa que só deva ser desempenhada depois das oito etapas anteriores. O planeamento de projeto pode ser preparado desde a Etapa 3. Ora, concretamente, um plano de projeto resulta num *roadmap* para o esforço de desenvolvimento a jusante. Para a sua elaboração, o primeiro passo consiste em compreender e representar tarefas e as dependências entre elas, que podem ser de tipo sequencial, paralelo ou acoplado<sup>10</sup>. A Matriz de Estrutura de Design (DSM) é uma ferramenta útil que, ao colocar as tarefas em dois eixos, facilita a análise destas dependências. Os gráficos PERT (Técnica de Revisão e Avaliação do Programa) são úteis para mapear as dependências e os *timings* das tarefas, e permitem a gestão do *critical path*<sup>11</sup>, que dita a duração do projeto [79]. Os mapas de Gantt [80] são igualmente úteis para melhor visualizar a distribuição sequencial das tarefas no tempo. Adicionalmente, os autores [77] propõem uma *baseline* de planeamento de projeto que inclui várias medidas de ação e um conjunto de ferramentas de auxílio. O livro de contratos [81] é fundamental para esta etapa. A palavra “contrato” enfatiza que o documento respetivo representa um acordo formal entre a equipa de desenvolvimento e a gestão executiva. Neste leque de documentos, inclui-se uma lista de competências juntamente um descritivo de alocação de pessoas e de organização das equipas, incluindo estimativas da quantidade de pessoas para cada tarefa e para todo o projeto. O orçamento do projeto também deve estar incluído, assim como o plano de gestão de risco do projeto. Deve também constar um documento de registo das alterações à linha de referência do planeamento de projeto. Adicionalmente, uma medida bastante útil que deve ficar registada, é a aceleração do projeto, que envolve medidas como a otimização do *critical path*. Nota geral: deve ser incluído no livro de contratos todos os *outputs* de cada uma das treze etapas [77].

---

<sup>10</sup> Tarefas acopladas devem ser executadas simultaneamente com trocas contínuas de informações, ou executadas iterativamente [77].

<sup>11</sup> O *critical path* (caminho crítico) é a maior cadeia de eventos dependentes, pelo que um atraso em qualquer uma dessas tarefas críticas resultaria no aumento da duração do projeto [77].

**Análise de aplicabilidade:** construir o melhor CPS possível, mas só com características necessárias, com o menor custo possível, da forma mais eficiente possível, para ajudar um negócio sem o prejudicar, é o objetivo macro que deve ser transversal em toda a capilaridade de tarefas. Para concretizar este objetivo, pode ser crucial aplicar no desenvolvimento de CPS as medidas de ação e ferramentas de auxílio do desenvolvimento de produto genérico, descritas no parágrafo anterior. Uma tarefa de projeto tanto pode ser uma tarefa de desenvolvimento conceptual, como de construção ou implementação reais do CPS. Assim, os diferentes *outputs* descritos acima podem ser extremamente úteis. De igual modo, o livro de contratos deve arquivar todos resultados das etapas de desenvolvimento de CPS.

### 3.3.10. ETAPA 10 – DEFINIÇÃO DA ARQUITETURA DE PRODUTO

Qualquer produto pode ser pensado em termos funcionais e físicos. Os elementos funcionais são as operações e transformações individuais que contribuem para a performance geral do produto. Geralmente são descritos de forma esquemática antes de serem concretizados em tecnologias, componentes ou princípios físicos de trabalho específicos. Os elementos físicos de um produto são as peças, componentes e conjuntos de ambos que implementam as funções do produto. Alguns elementos físicos são preliminarmente ditados pelo conceito do produto e outros são definidos durante a fase de design detalhado. Os elementos físicos de um produto geralmente são organizados em vários “blocos” de construção físicos principais. Assim, a definição da arquitetura do produto é a atribuição dos elementos funcionais aos blocos do produto. O objetivo passa por definir os blocos básicos do produto em termos do que eles fazem e quais são as suas interfaces para o resto do produto. As decisões desta definição permitem que o projeto e o teste detalhados desses componentes sejam atribuídos a equipas, indivíduos e/ou fornecedores, de modo a que o desenvolvimento de diferentes partes do produto possa ser realizado simultaneamente. É importante definir bem o nível de modularidade por cinco razões diferentes. Primeiro, porque facilita mudanças nos produtos (ver Tabela 3.2) [77]. Em segundo lugar, porque possibilita uma gama mais variada de modelos de produtos, dando melhor resposta às exigências de mercado. Isto porque produtos construídos sobre arquiteturas modulares podem ser mais facilmente variados, sem acarretar complexidades tremendas ao sistema de fabrico. Em terceiro lugar, porque facilita a standardização de componentes, que consiste em usar o mesmo componente, ou bloco de componentes, em vários locais. Ou seja, se um bloco implementar apenas um ou poucos elementos funcionais amplamente úteis, poderá ser standardizado e, por conseguinte, usado em várias partes de CPS diferentes. Isto pode levar a reduções de custos e melhorias de qualidade. Em quarto lugar, porque facilita a otimização da performance do produto. Aqui, performance refere-se ao quão

Tabela 3.2 – Tipos de mudanças nos produtos, facilitadas pela modularidade da arquitetura [77].

MUDANÇA	DESCRIÇÃO
ATUALIZAÇÕES	A fim de acompanhar avanços tecnológicos ou evoluções das necessidades do utilizador.
ADD-ONS	Muitos produtos são vendidos por um fabricante como uma unidade básica, à qual o utilizador adiciona componentes.
ADAPTAÇÕES	Alguns produtos de longa duração podem ser usados em vários contextos de uso diferentes, exigindo adaptação.
MANUTENÇÃO	Elementos físicos de um produto podem deteriorar-se com o uso, exigindo a substituição dos componentes desgastados para prolongar a vida útil do produto.
CONSUMO	Alguns produtos consomem materiais, que devem poder ser facilmente reabastecidos.
FLEXIBILIDADE	Alguns produtos podem ser configurados pelo utilizador para fornecer capacidades diferentes.
REUTILIZAÇÃO	Ao criar produtos subsequentes, a empresa pode querer alterar apenas alguns elementos funcionais, mantendo intacto as restantes partes do produto.

bem um produto implementa as funções pretendidas, face a características como a velocidade, eficiência, vida, precisão ou ruído. Em quinto e último lugar, porque facilita a capacidade de fabrico, ao proporcionar a capacidade da equipa de projetar cada bloco a ser produzido a baixo custo (ver subcapítulo 3.3.11.3, “design para fabrico”). O *output* desta etapa inclui diagramas do produto, que descrevem o entendimento dos elementos constituintes do produto, e *layouts* geométricos grosseiros, criados em duas ou três dimensões, usando desenhos, modelos de computador, ou modelos físicos. Um passo essencial é a identificação e esquematização de interações fundamentais, incluindo as interações imprevistas, que surgem devido à implementação física específica de elementos funcionais ou por causa do arranjo geométrico dos blocos. Ferramentas como o gráfico de interações e a matriz de interações são úteis para o efeito. Finalmente, uma arquitetura de produto não fica bem definida sem a correta definição de sistemas secundários, a definição da arquitetura dos blocos e a criação de especificações detalhadas para as interfaces [77].

**Análise de aplicabilidade:** um CPS pode também ser pensado em termos funcionais e físicos da mesma maneira que um produto genérico. Os elementos funcionais devem ser estudados e esquematizados antes de se pensar em tecnologias específicas. No exercício de definição da arquitetura do CPS, é importante não esquecer de considerar os três tipos de componentes: computacional (CC), físico (PC) e humano (HC) (ver Figura 2.5) e os níveis do Modelo Final de CPS onde estes se encontram (Figura 2.6). Um subsistema de um CPS é composto por vários blocos de componentes. Assim, a definição da arquitetura do CPS é de igual modo a atribuição dos elementos funcionais de um produto aos seus blocos de construção físicos. O objetivo é também o mesmo: definir os blocos de construção físicos básicos do CPS em termos do que eles fazem e quais são as suas interfaces para os restantes blocos do CPS. No desenvolvimento de CPS é também importante projetar a modularidade da arquitetura e a divisão dos blocos de funções e componentes. Por exemplo, para alcançar o primeiro nível C, “Conexão”, uma das medidas é “adquirir dados precisos e confiáveis das máquinas e dos seus componentes”, que requer a criação de um bloco de sensores alocados a um bloco de componentes de um contexto físico para a recolha de dados brutos. Esta recolha será direcionada a outro bloco de sistema de informação que irá processar o tratamento de dados, e por aí em diante. A criação destes blocos possibilita a modularidade do CPS. Estas decisões poderão também ter implicações de como é que o produto pode ser mudado e atualizado, a fim de se estar a par das necessidades e progressos do negócio, que se refletem no sistema produtivo e, portanto, no CPS. Pode ser relevante elaborar um design de CPS que possibilite a introdução de complementos ou *add-ons*, i.e. dispositivos e componentes, facultando melhores capacidades de adaptação, manutenção, flexibilidade e reutilização de partes do CPS. O tópico das adaptações também tem potencial de aplicabilidade, uma vez que pode ser útil poder usar partes de CPS em vários contextos diferentes de produção. Por exemplo, um atuador e os componentes onde este poderá ser utilizado, devem ser standardizados, a fim de o atuador poder ser usado em múltiplos blocos. Do mesmo modo, a correta definição da modularidade da arquitetura é preponderante para facilitar a otimização da performance do CPS. Os referidos Diagramas são úteis para conseguir organizar os vários componentes e dispositivos do CPS e conseguir planificar as suas interações. Por exemplo, pode-se ter um conjunto de sensores e outro de atuadores, que estão espalhados em máquinas e ferramentas ao longo do contexto produtivo. É útil conseguir esquematizar para que serve cada sensor, planear as interações que têm com dispositivos de sistemas de informação, que funções é que esses sistemas têm, e que interações posteriores deverão estar configuradas com

os atuadores. Podem também existir interações imprevistas, como o atraso no fornecimento de matéria-prima (m-p), que requer configurações adicionais. Todos os blocos de *hardware* e *software* de cada um dos níveis 8C (ver Figura 2.5 e Figura 2.4) devem ser pensados e projetados, sendo que cada subsistema do CPS pode ter vários blocos. Depois, é necessário projetar as diferentes interfaces entre os vários níveis 8C e os três tipos de componentes PC/CC/HC.

### **3.3.11. ETAPA 11 – DESIGN DE PRODUTO**

Este subcapítulo está dividido em 4 secções: design industrial (1), design para o ambiente (2), design para fabrico (3) e design robusto (4). No desenvolvimento de CPS, o nível de esforço em cada um dos quatro tipos de design depende do BM (e o mesmo se poderia dizer no caso do desenvolvimento de produto genérico). Por exemplo, se o Modelo estipula que a prioridade é a garantia de qualidade do CPS, o design robusto deve ser o foco principal; se a ergonomia é a prioridade, o design industrial deve ser o foco da equipa. Segundo Eppinger e Ulrich [77], os quatro designs abrangem todo o processo de PDD que vai desde a Fase I até à Fase V (exceto o design para fabrico (3), que deve ser iniciado apenas na Fase II).

#### **3.3.11.1. DESIGN INDUSTRIAL**

O principal objetivo do design industrial é projetar os aspetos de um produto que se relacionam com o utilizador: estética e ergonomia. Quando o sucesso de um produto depende mais da tecnologia, o design industrial pode ser integrado numa fase tardia do processo de desenvolvimento. Essa comunicação facilita a coordenação e, por conseguinte, pode significar produtos de melhor qualidade. Além da garantia de segurança e proteção, os resultados do design ergonómico incluem uma maior facilidade de utilização e manutenção e maior quantidade, qualidade e novidade das interações e interfaces do utilizador. Quanto à estética, as vantagens podem vir da melhor diferenciação do produto, maior orgulho de *ownership* e imagem, e motivação da equipa de desenvolvimento [77].

**Análise de aplicabilidade:** o projeto do CPS não é desenvolvido para fins comerciais de venda do próprio CPS a clientes externos, pelo que o fator de estética não é muito importante, mas não deve ser totalmente ignorado. A estética do CPS deve ser trabalhada numa perspetiva ergonómica de utilização e também para manter os *standards* de imagem e identidade da empresa. Para o CPS, a ergonomia é o tópico importante no design industrial. Podendo o CPS ser maioritariamente tecnológico, o design ergonómico pode ser desenvolvido numa fase avançada. Analisando os *outputs* descritos acima, uma vez que é importante que o CPS seja fácil de usar e de manter, e que possibilite formas de interação com o sistema produtivo que sejam flexíveis, úteis e seguras, pode-se concluir que os *outputs* são úteis. Mesmo a qualidade estética das novas ferramentas do CPS pode causar um efeito motivacional nos operadores.

#### **3.3.11.2. DESIGN PARA O AMBIENTE**

O objetivo principal do design para o ambiente é minimizar ou eliminar os impactos ambientais de um produto. Consiste em considerar o ciclo de vida do produto e a sua relação com o meio ambiente. Desde a extração de matérias-primas a partir de recursos naturais, passando pela produção, e indo até à distribuição e utilização do produto. No fim de vida útil, existem várias opções de recuperação: refabrico ou reutilização de componentes, reciclagem de materiais, descarte por incineração ou deposição num aterro. Um bom desempenho nesta etapa requer a elaboração de uma Agenda de Design para o ambiente, que inclui fatores impulsionadores, metas e equipas de ação. A Identificação de impactos



ambientais e a estipulação de Diretrizes para o Design para o ambiente são duas medidas de ação preliminares muito importantes, que servem de base para a aplicação prática das mesmas no design inicial do produto. A par de tudo isto devem ser avaliados os impactos ambientais. Para que os resultados da avaliação sejam incrementados, deve ser feita uma redefinição iterativa do design de produto para reduzir ou eliminar os impactos identificados [77].

**Análise de aplicabilidade:** a preservação do meio ambiente é sempre uma preocupação para qualquer empresa, especialmente para as do tecido industrial. O Design para o ambiente de um CPS deve endereçar duas vertentes de impacto. A primeira é o impacto ambiental do fabrico de componentes necessários para o CPS e da sua implementação. Por exemplo, deve-se procurar fazer um planeamento de processo de desenvolvimento eco-eficiente que evite a construção de partes de CPS inutilizáveis. A segunda vertente consiste no impacto ambiental do funcionamento e utilização do CPS. Esta última é a mais importante, e todos os detalhes de ação descritos acima podem trazer muitos benefícios à organização. Assim, todos estes resultados têm aplicabilidade direta no processo de desenvolvimento de CPS, porque para minimizar o impacto ambiental da produção do CPS e da utilização do CPS, é relevante elaborar um plano de design para o ambiente, que defina Diretrizes, e permita mitigar o impacto ambiental das práticas industriais.

### **3.3.11.3. DESIGN PARA FABRICO**

O objetivo principal deste design é reduzir os custos de fabrico e, ao mesmo tempo, melhorar, ou pelo menos não comprometer inadequadamente, a qualidade do produto, assim como o tempo e o custo de desenvolvimento. Abrange as fases de desenvolvimento pós-conceptual, nas quais muitas decisões importantes devem ser tomadas com as implicações dos custos de fabrico em mente. Assim, esta etapa consiste num método integrador de cinco passos. O primeiro passo consiste em estimar os custos de fabrico, utilizando ferramentas como os Modelos simples de *input-output*, ou os Diagramas de custos elementares de fabrico, que incluem os custos de componentes, montagens, transporte e despesas gerais. Deve-se incluir estimativas de custos fixos versus custos variáveis. A Lista de materiais deve também ser elaborada, alistando materiais comprados, processamento (máquinas e mão-de-obra), montagem (mão-de-obra), custo unitário variável total, ferramentas e outros custos não recorrentes, tempo de vida da ferramenta, custo unitário fixo total e custo total. A par desta Lista, devem ser feitas estimativas de custos de componentes standard, de componentes personalizados, e também de custos de assemblagens. A finalidade de todas estas estimativas e cálculos de custos é orientar e priorizar esforços de redução de custos, que é o objetivo dos três passos seguintes. O segundo passo consiste na redução de custos de componentes, começando com a compreensão dos estrangimentos e impulsionamentos do custo. Depois, procede-se o redesign de componentes, a fim de eliminar etapas de processamento que não incrementam valor. Outra medida de ação crucial é a definição da dimensão da economia de escala. Ou seja, deve-se estimar qual o volume de produção ideal, tendo em conta que o custo de fabrico de um produto geralmente cai à medida que o volume de produção aumenta. A standardização de componentes e processos é crucial para a economia de escala. O terceiro passo é a redução de custos de assemblagem e inclui a maximização da facilidade de montagem. O quarto passo é a redução de custos de suporte à produção, que envolve a minimização da complexidade sistemática e a realização de provas de erro, de forma a antecipar os modos de falha. Finalmente, o quinto passo consiste na análise do impacto das decisões do design para manufatura, nomeadamente, o impacto tanto no tempo e custo de desenvolvimento, como na qualidade do produto

e outros fatores [77].

**Análise de aplicabilidade:** para o desenvolvimento de CPS, esta atividade chamar-se-ia Design para Fabrico e Implementação. Tem como objetivo a redução de custos de aquisição de componentes (fabrico ou compra), assim como de custos de construção e montagem do CPS (implementação). Este objetivo é perseguido à medida que se tenta melhorar a qualidade do CPS. Irá igualmente ter início na Fase II. Todas as decisões que irão ser tomadas afetarão o custo de desenvolvimento, a qualidade do CPS e a viabilidade de implementação, pelo que vários *trade-offs* acontecerão frequentemente, entre o custo e estes tópicos acima. Pretende-se agora, portanto, elaborar o design de um CPS que não só economize ao máximo os custos de fabrico e das operações necessárias, mas também que o próprio CPS seja económico. A generalidade dos *outputs* têm potencial de aplicabilidade. De facto, poderá ser bastante útil a realização de estimativas de custo de fabrico e implementação para orientar e priorizar os esforços de redução de custos de aquisição ou produção de componentes e dispositivos para o CPS. Os sistemas de informação referidos (Lista de componentes, estimativas, modelos, etc.) têm potencial de aplicabilidade especialmente para a atividade de design para fabrico (aquisição ou produção de componentes ou dispositivos para o CPS). Porém, mediante adaptação, estes documentos também podem ter utilidade para o design para implementação (que inclui a operacionalização, testes e integração do CPS, e o assegurar do seu funcionamento). As ferramentas de redução de custos também podem ser bastante úteis à empresa e equipa de desenvolvimento de CPS. É necessário entender as causas e constrangimentos dos custos, é importante re-projetar alguns componentes, a fim de eliminar etapas de processamento, é relevante a padronização de componentes e processos. Do mesmo modo, todos os *outputs* da redução de custos de montagem e de suporte à produção têm aplicabilidade para o desenvolvimento de CPS. Por exemplo, na recolha dos dados brutos de um processo através de sensores e no envio desses dados para uma base de dados, as decisões do número de sensores e a qualidade dos mesmos deve ser estudada de forma a minimizar a complexidade e os custos resultantes. Por fim, a análise do impacto de todas as decisões tomadas nesta atividade deve ser também elaborada.

#### **3.3.11.4. DESIGN ROBUSTO**

O design robusto inclui um conjunto de métodos de projeto de engenharia usados para criar produtos e processos robustos. Um produto (ou processo) robusto é aquele que funciona adequadamente mesmo na presença de efeitos de ruído. Assim como todas as etapas, esta também consiste num processo iterativo. Inicia-se com a identificação dos fatores de controlo, fatores de ruído e as métricas da performance. Fatores de controlo são variáveis de projeto que estão destinadas a serem variadas de maneira controlada durante o ensaio. Fatores de ruído são variáveis que não podem ser explicitamente controladas durante o fabrico e operação do produto. As métricas de performance são as especificações de produto de interesse para o ensaio (ver Etapas 4 e 8). Geralmente, elaboram-se aqui Diagramas de Parâmetros, em que os fatores são os *inputs* e as métricas são os *outputs*, o que ajuda a entender a lógica e a sistematizar a informação. A Tabela de parâmetros, pode ser feita juntamente com o diagrama, possibilitando a escolha dos parâmetros a explorar. O passo seguinte consiste em formular uma função objetivo, a partir da transformação das métricas, permitindo a maximização ou minimização dos valores das especificações. O terceiro passo consiste em desenvolver um plano de ensaios, incluindo alguns designs experimentais e testes de fatores de ruído. O quarto e quinto passos consistem em executar esse plano e conduzir análises durante os ensaios. Estas análises podem ser

aprimoradas através da informatização dos efeitos dos fatores. Finalmente, o sexto passo deve incluir a seleção e confirmação de pontos de ajuste de fatores [77].

**Análise de aplicabilidade:** se a garantia de qualidade e fiabilidade (entre outros requisitos) do produto final for um dos principais motes no BM, é necessário que o design do CPS seja robusto, a fim de que o seu *output* de produção seja também ele robusto. Assim, os fatores de ruído das máquinas, componentes e dispositivos onde o CPS atua, devem ser estudados. Não se pode admitir automatização de uma ferramenta com falta de precisão, seria estar a prejudicar em vez de beneficiar o sistema de produção. A identificação de parâmetros demonstra ter potencial de aplicabilidade para o desenvolvimento de CPS. O diagrama de parâmetros resultante é útil para fazer um estudo holístico de todos os fatores que impactam a performance do CPS e as métricas que estão associadas a esses fatores. Por exemplo, depois de fazer examinar todo o processo produtivo, que pode ser uma célula de fabrico, com várias máquinas e entradas de matéria-prima ou peças, identificam-se vários fatores de controlo e de ruído, em cada uma das máquinas e peças a entrar. Também vários fatores humanos podem entrar na equação. O estudo da função objetivo pode ser interessante em alguns projetos, pois permite otimizar o design. Os planos de ensaios e as análises subsequentes têm também um grande potencial de utilidade, pois são estes que concretizam e conferem o design robusto ao CPS.

### 3.3.12. ETAPA 12 – PROTOTIPAGEM

O desenvolvimento de produtos requer quase sempre a construção e teste de protótipos. Um protótipo é uma aproximação do produto em uma ou mais dimensões de interesse. Duas dimensões usuais são: o grau sobre o qual são físicos e não analíticos; e o grau segundo o qual são abrangentes em vez de focados. Os protótipos físicos são geralmente melhores para comunicação e os protótipos abrangentes, para integração. Os protótipos analíticos são geralmente mais flexíveis que protótipos

Tabela 3.3 – Categorização de protótipos consoante a finalidade e a tecnologia, adaptado de [77].

CATEGORIA		DESCRIÇÃO DOS PROTÓTIPOS
FINALIDADE	<b>Análise e compreensão</b>	Permitem resposta às perguntas “Será que irá funcionar?” e “Quão bem é que o produto atende às necessidades do cliente?”.
	<b>Comunicação</b>	Enriquecem a comunicação com o conselho de gestão, fornecedores, parceiros, membros da equipa, incluindo os que possam estar em geografias diferentes, clientes e investidores.
	<b>Integração</b>	São usados para garantir que os componentes e subsistemas do produto funcionam juntos conforme esperado.
	<b>Aprovação de marcos importantes</b>	Particularmente nas fases tardias do desenvolvimento de produto, são usados para demonstrar que o produto alcançou o nível desejado de funcionalidade. Fornecem metas tangíveis, demonstram progresso e servem para reforçar o cronograma. Esta categoria pode ser dividida em quatro subcategorias, que descrevem protótipos de acordo com a fase temporal de desenvolvimento (informação sobre cada um está disposta na Tabela 3.4).
TECNOLOGIA	<b>Modelação e simulação por CAD</b>	Nesta categoria, incluem-se os <i>mock-ups</i> digitais e protótipos virtuais. A modelação 3D destes protótipos possibilita capacidades de visualização ágil da forma tridimensional do design, criação de imagens foto-realistas para avaliação da aparência do produto, cálculo automático de propriedades físicas, como massa e volume, e a criação automática de desenhos de fabrico e vistas em corte transversal.
	<b>Fabrico aditivo por CAM</b>	Esta tecnologia consiste na concretização real da modelação por CAD 3D. Ao criar objetos físicos diretamente de modelos CAD 3D, cria-se a capacidade de fabrico de formas livres de forma ágil e rápida. O fabrico aditivo, ou impressão 3D, é um Conceito Tecnológico. Mais informação consta na Tabela 2.3.

físicos, mas estes últimos, por sua vez, são necessários para detetar fenómenos imprevistos. A prototipagem pode ser uma etapa crucial, uma vez que pode reduzir o risco de iterações caras e pode acelerar outras etapas de desenvolvimento, além de proporcionar a reestruturação das dependências entre tarefas. Nesse sentido, é útil categorizar os protótipos consoante a sua finalidade prática e a sua natureza tecnológica (ver Tabela 3.3) [77]. Primeiro, define-se o propósito do protótipo, assim como o seu nível de aproximação às características e funcionamento reais. Seguidamente, é delineado um plano de ensaios e testes, juntamente com um cronograma que contemporize as diferentes aquisições internas ou externas de peças (fabrico ou compra), as diferentes modelações, as montagens e os testes de utilização semelhante à real. Finalmente, é também indispensável elaborar o planeamento de prototipagem de marcos importantes no processo de desenvolvimento (ver a categoria “marcos importantes” na Tabela 3.3) [77]. Para isso, é importante dividir esta categoria em quatro subcategorias diferentes, como esta sistematizado na Tabela 3.4 [77]. Todavia, no decorrer do desenvolvimento, é normal que se evidencie desvios relativamente ao plano de prototipagem previamente estabelecido. Entre os desvios mais comuns, encontra-se a eliminação ou a adição de protótipos. A eliminação de um protótipo, que geralmente acontece com os alfa, pode ser possível se o produto for muito semelhante a outros produtos que a empresa já desenvolveu e produziu, ou se o produto for extremamente simples [77].

Tabela 3.4 – Protótipos de aprovação de marcos importantes, adaptado de [77].

CATEGORIA	DESCRIÇÃO DOS PROTÓTIPOS
<b>PROTÓTIPOS EXPERIMENTAIS OU DE ENGENHARIA</b>	São comuns no início do processo de desenvolvimento e em situações em que o produto incorpora um novo conceito ou tecnologia. Geralmente, não se parecem com o produto final, e muitas das suas partes não são projetadas com a intenção de eventualmente serem produzidas em quantidade.
<b>PROTÓTIPOS ALFA</b>	São usados para avaliar se o produto funciona como pretendido. As peças constituintes geralmente são constituídos por material e geometria semelhantes ao das peças que irão ser usadas na versão de produção, mas geralmente são feitas com processos de produção de protótipos, por vezes em escalas reduzidas.
<b>PROTÓTIPOS BETA</b>	São usados para avaliar a fiabilidade e identificar os restantes erros do produto. Geralmente são fornecidos aos clientes para teste no ambiente de uso pretendido. As peças nos protótipos beta geralmente são fabricadas com processos de produção reais ou fornecidas pelos fornecedores de componentes pretendidos. Porém, o produto geralmente não é montado com a ferramenta ou instalação de montagem final pretendida.
<b>PROTÓTIPOS DE PRÉ-PRODUÇÃO</b>	São os primeiros produtos produzidos por todo o processo de produção e servem para verificar a capacidade do processo de produção. São submetidos a testes adicionais, e geralmente são fornecidos aos clientes preferenciais para testes e <i>feedback</i> adicionais.

**Análise de aplicabilidade:** a construção e teste de protótipos pode ser muito útil para o CPSDD. Podem ser construídos protótipos em todo o espectro das duas dimensões referidas. Inicialmente, podem ser desenvolvidos protótipos virtuais de identidades físicas ou mesmo de processos físicos, criando assim simulações e utilizações do *digital twin* (ver definição na Tabela 2.2) de alguns blocos ou subsistemas do processo. Assim pode-se facilitar o estudo das soluções de software (meios computacionais) com simulações virtuais das dinâmicas envolvidas. À medida que se forem desenvolvendo e construindo protótipos físicos, podem ser utilizados os meios computacionais utilizados durante as simulações com o *digital twin*. Muitos destes protótipos físicos, ou pelo menos alguns componentes ou dispositivos que deles fazem parte, são utilizados no CPS final. A construção de um CPS pode ser dispendiosa, por isso quanto mais for testado o *digital twin* virtualmente melhor. Poderá ser útil para o desenvolvimento de CPS a construção de protótipos que facilitem uma compreensão de quais são os dispositivos e componentes que funcionam bem no contexto em questão. Desenvolver protótipos virtuais, através de *softwares* que proporcionam uma visão geral de todo o CPS, pode ser vantajoso, porque

permitem elaborar simulações de fluxos de materiais e de informações, assim como análises e reformulações de *layouts* de tecnologias, por exemplo. Além disso, podem servir como prova de que a solução funciona e, portanto, vale a pena investir na mesma. Os protótipos são também importantes para ter a certeza de que um certo nível do modelo conceptual do CPS (8C, ver Figura 2.4) foi atingido, ou um certo nível de fiabilidade foi alcançado, ou que uma capacidade realmente funciona. As ferramentas computacionais referidas podem facilitar o design das interfaces (ver finalidade de integração, na Tabela 3.3) e até suportar as reuniões da equipa de desenvolvimento com o conselho executivo da empresa, onde se apresenta soluções, planeamentos e previsões (mapas PERT), e se pretende obter aprovações necessárias (finalidades de comunicação e aprovação de marcos importantes, na Tabela 3.3). Aqui pode-se usar o Conceito Tecnológico MES, que possibilita a visualização global dos processos, através da recolha e tratamento de dados. Dentro de um MES, pode-se usar softwares de informação para simular o aceleramento desse tratamento de dados e testar algoritmos de tomadas de decisão. Podem também permitir análises e vistas gerais da situação atual do CPS e do sistema produtivo. Por serem flexíveis e muitas vezes serem acessíveis, os protótipos virtuais podem ser usados continuamente em todas as fases do desenvolvimento. Além do mais, em aspetos simples, particulares, ou até críticos, podem mesmo ser montados alguns protótipos físicos, ou parte destes. Por exemplo, no caso de testes preliminares de atuadores para tarefas processuais em máquinas, antes da fase de *ramp-up*, para compreensão conceptual de qual o modelo de atuador mais adequado, podiam ser usados protótipos experimentais (ver primeira linha da Tabela 3.4). Em blocos de funcionalidades críticas para o negócio, pode fazer sentido desenvolver protótipos físicos complexos que serão mais tarde utilizados e incorporados no sistema geral. As tecnologias de CAD e CAM possibilitam a criação rápida e flexível de protótipos de componentes físicos que podem ser importantes para os testes do CPS. Assim, os passos desta etapa de prototipagem, descritos acima, devem ser seguidos para que, através de um planeamento que vai de encontro à declaração de missão (*output* da Etapa 2) e que se enquadra no planeamento de projeto (Etapa 9), se invista apenas em prototipagem que o desenvolvimento realmente necessita. A definição do propósito do modelo virtual de uma parte do processo, ou do processo completo, é importante para que o protótipo abranja todo o contexto produtivo em causa. Pode ser feita uma simulação do processo físico, com componentes físicos e cibernéticos simulados virtualmente. O plano de ensaios irá contar com ensaios virtuais e ensaios no processo físico com as máquinas e componentes, primeiro de teste, se existirem materiais que se possam usar como amostras, e depois finais, de uso no contexto real.

### **3.3.13. ETAPA 13 – EXECUÇÃO DE PROJETO**

Uma execução harmonizada de um projeto bem planeado depende de ações de gestão ao longo de três vetores: utilização de mecanismos de coordenação de tarefas; supervisão e avaliação do status do projeto; e correção de desvios indesejados face ao plano de projeto. As várias ações correspondentes a cada vetor (coordenação, avaliação e correção) estão descritas na Tabela B – 1. A execução é tão importante quanto o planeamento. Muitas equipas falham em alcançar o sucesso porque não permanecem focadas em objetivos durante o projeto [77].

**Análise de aplicabilidade:** novamente, o CPS pode ser um sistema composto por vários subsistemas que, por sua vez, são compostos por vários componentes. Cada um desses subsistemas ou cada componente pode ser desenvolvido por uma equipa ou pessoa diferente. Por isso, pode ser im-

portante a coordenação entre as várias equipas de desenvolvimento. Também irão aparecer imprevistos e fatores inevitáveis que necessitam de medidas de controlo de gestão que os mitigue. Por exemplo, a equipa que está encarregue da modelação do processo pode ter colocado um valor na métrica de tempo de espera de um dispositivo que não condiz com o planeado pela equipa que recolheu informações do processo real. Quanto aos mecanismos de coordenação, a liderança formal e informal, suportada pelos registos das diferentes etapas e pelo cronograma do projeto (mapas PERT), é essencial para a execução do projeto. O objetivo é que cada pessoa e equipa atinja as metas pretendidas, e que se chegue a um CPS com os seus subsistemas e blocos que encaixam como pretendido. Na verdade, todos os tópicos descritos na Tabela B – 1 devem ser levados a cabo durante as fases de desenvolvimento e de implementação do CPS, porque só através do resultado positivo de uma análise de conformidade da qualidade e *timing* do design de uma função do CPS é que se pode avançar para o teste da função do bloco seguinte. Por exemplo, assegurar que o design do controlo descentralizado de um robô e a programação do mesmo para desempenhar uma sequência de tarefas diferentes está concluído. Garantir que as várias etapas que são desenvolvidas paralelamente são efetivamente cumpridas em consonância, é uma ação essencial na execução do projeto. A avaliação regular do panorama atual do projeto, onde se analisa minuciosamente a documentação resultante das etapas, incluindo em papel, em vídeo ou prototipagem, é crucial para a identificação de problemas e áreas críticas. Só assim é que se pode identificar oportunidades de melhoria e aplicar corretivos. Após estar concluída a implementação e assegurado o correto funcionamento do CPS, a avaliação deve ser realizada através de reuniões de avaliação de resultados e performances. Deve também ser realizada uma análise à evolução das capacidades do sistema produtivo em causa, a fim de confirmar que todos os objetivos foram alcançados, e identificar oportunidades de melhoria para pôr em prática no próximo processo de desenvolvimento. Como foi mencionado no subcapítulo 3.1, usualmente, o desenvolvimento do CPS é realizado por uma empresa externa, em colaboração com a Empresa A onde se implementará o CPS. Neste cenário, por exemplo, se o engenheiro da equipa de desenvolvimento que está a desenvolver a tarefa de modelar os processos com sensores, não consegue compreender a técnica do processo de fresagem ou de estampagem, é importante que seja auxiliado ou mesmo substituído por um engenheiro especialista. Apresentando outro exemplo, se se estiver a implementar um novo MES, que inclui vários softwares e dispositivos desconhecidos, pode fazer sentido que a equipa de desenvolvimento auxilie na implementação do mesmo e na aprendizagem dos utilizadores, através de sessões de formação.

### **3.4. ANÁLISE GERAL**

Terminadas as análises de aplicabilidade às fases e etapas da metodologia de PDD [77], ficou salientado que a grande generalidade dos passos, lógicas e métodos são de elevado nível de aplicabilidade. Pode-se, agora, naturalmente afirmar que pode ser muito útil considerar que o produto em desenvolvimento é um CPS e seguir todas as instruções de PDD. É também notável como esta pode ser uma abordagem que preenche, com várias propostas de métodos e ferramentas, a lacuna identificada na Literatura: a inexistência de uma metodologia que se foca no desenvolvimento de um CPS que de facto ajude a empresa a melhorar a sua performance. Não só cada etapa é aplicável como a lógica da sequência, iteratividade e acoplagem entre as diferentes fases e etapas é aplicável. Assim, no capítulo 4, a proposta desta dissertação será uma Metodologia de CPSDD com a mesma estrutura e lógica sequencial, ainda que com algumas alterações e adaptações. Algumas dessas adaptações já foram introduzidas nas análises de aplicabilidade dos subcapítulos anteriores.

## 4. PROPOSTA DE METODOLOGIA DE DESIGN E DESENVOLVIMENTO DE SISTEMAS CIBER-FÍSICOS (CPSDD)

### 4.1. ABORDAGEM METODOLÓGICA E ESTRUTURA DO CAPÍTULO

O objetivo da presente dissertação, e deste capítulo em particular, é demonstrar que faz sentido começar e guiar o projeto de CPSDD tendo por base uma abordagem conceptual, onde se aplica a lógica e métodos do PDD [77]. Partindo das análises e conclusões do capítulo 3, pretende-se agora demonstrar com exemplos que em vez de partir do pressuposto que a empresa necessita de um CPS altamente capacitado e tecnológico, a abordagem mais lógica é partir das diretivas do BM, das oportunidades de desenvolvimento, da identificação de necessidades da organização, e desenhar o CPS partindo destas necessidades. Neste capítulo, mais particularmente no subcapítulo 4.3, pretende-se demonstrar isto mesmo, que só ao compreender profundamente a realidade da organização, e ao desenvolver escrupulosamente um conceito de CPS adaptado às necessidades reais, é que é possível lançar um projeto de implementação real de um CPS que a organização realmente necessita e no qual possa de facto investir e depois construir. Assim, a abordagem da metodologia proposta resulta da conjugação da informação dos capítulos 2 e 3. Ou seja, propõe-se uma metodologia de CPSDD alicerçada na lógica de fases e etapas de PDD [77], mas que se baseia ao mesmo tempo nos resultados da revisão de literatura sobre a Indústria 4.0 (Princípios de Design e Conceitos Tecnológicos), sobre o CPS (componentes, funcionalidades e requisitos) e sobre as abordagens existentes de design de CPS.

Começando com uma introdução ao caso de estudo da Empresa A (subcapítulo 4.2), prossegue-se com a proposta de design e desenvolvimento conceptual de CPS (subcapítulo 4.3 – âmbito principal da presente dissertação) que consiste numa abordagem de como desenvolver conceptualmente um CPS que vá de encontro às necessidades reais de uma organização e a ajude a melhor desempenhar o seu BM. Esta proposta abrange apenas as etapas das fases iniciais I e II. São apresentados exemplos de *outputs* de algumas etapas, aplicados ao caso de estudo. Estes são *outputs* e desenvolvimentos exemplo, que se acredita serem possíveis ou lógicos e até aos quais a empresa poderia chegar, na realidade. O objetivo é demonstrar como se desempenham as etapas, com exemplos dos principais *outputs*, não descrevendo todo o trabalho de desenvolvimento inerente e necessário. Resulta que, apenas se apresenta alguns exemplos que ajudam à compreensão da metodologia. Sendo bem desempenhado, o resultado do design e desenvolvimento conceptual é um conceito de CPS consistente e justificado, juntamente com um planeamento detalhado para os desenvolvimentos e design a jusante, para passar desse modelo conceptual para a implementação e construção reais do CPS. De facto, o CPS por definição é um sistema de sistemas, ou um todo que se divide em várias partes. Essas partes podem ser divididas em subpartes, chegando-se a uma decomposição hierárquica complexa. Ora, pode ser muito útil, ou até crucial, fazer este projeto onde se realiza o desenvolvimento de um conceito macro que parta das necessidades da organização e as traduza em recursos que, uma vez organizados, elaboram uma solução decomposta que se enquadra mais logicamente no tal sistema de sistemas.

É por isso que o subcapítulo seguinte (4.4) consiste numa proposta intitulada “do conceito à implementação”. Propõe-se que esta concretização real seja feita seguindo também as fases I, II, III, IV e V de PDD [77] agora a um nível micro, ao nível de cada bloco de CPS e cada componente e funcionalidade de cada bloco. Deve-se, então, realizar um subprojeto para cada parcela de CPS, e

quanto maior for a divisão em subprojetos para cada componente e funcionalidade, e quanto maior for o grau de aprofundamento de alternativas de soluções, mais ajustada será cada solução às reais necessidades da organização. Esta concretização real já requer conhecimentos mais tecnológicos e específicos, no âmbito da engenharia de sistemas, informática e eletrónica, existindo já vários modelos e abordagens que cobrem esta parte do desenvolvimento de CPS de forma extensiva e coerente. Assim, apesar de não se apresentar exemplos de aplicação ao caso de estudo, nem os passos detalhados para cada etapa, elaborou-se o subcapítulo 4.4 com o objetivo de introduzir a conjugação dos capítulos 2 e 3 também para as fases avançadas de implementação real. Assim, o leitor pode encontrar uma análise de paralelismo e complementaridade entre a parte final da Fase I e das Fases II, III, IV e V de PDD [77] e a abordagem de Jensen *et al.* [64] (ver Tabela 2.15), escolhida entre várias alternativas. Finalmente, na Figura 4.1 é apresentado um esquema que explicita a estrutura e lógica do capítulo 4 e metodologia nele proposta.

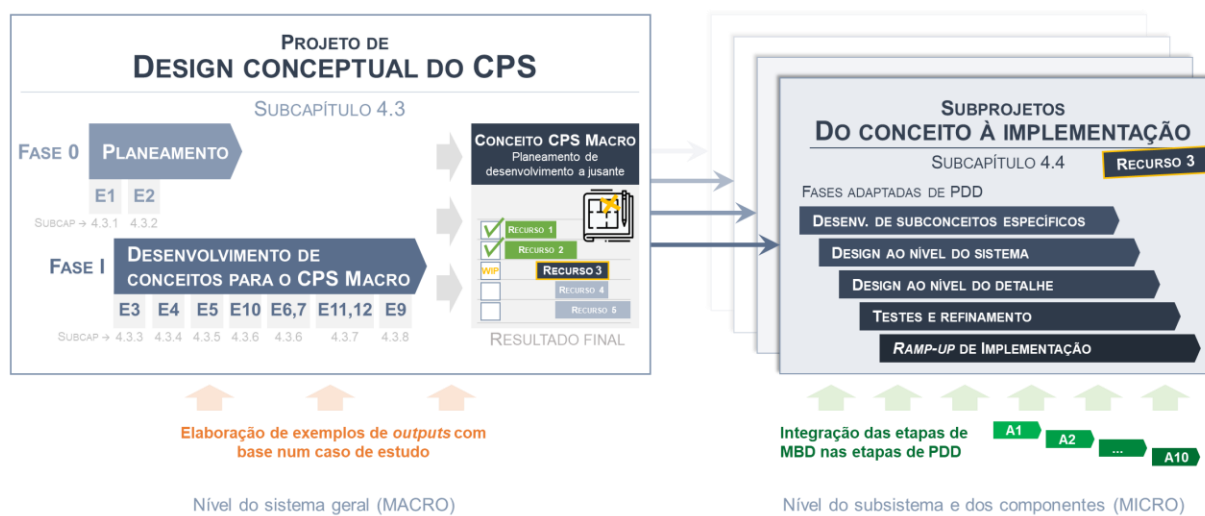


Figura 4.1 – Lógica e estrutura do capítulo 4.

## 4.2. INTRODUÇÃO AO CASO DE ESTUDO

A fim de apresentar a proposta de metodologia de design e desenvolvimento de CPS de forma explícita e concreta, foi elaborado um contexto-exemplo de uma empresa do sector de silvicultura, com base no caso de estudo realizado no âmbito de uma dissertação de mestrado por Machado [82]. Os dados da empresa real apresentados na dissertação do colega serviram de base para a elaboração do caso de estudo da Empresa A. Assim, o caso de estudo da presente dissertação resulta não só de várias simplificações da situação em contexto real, como da adição de complementos de outras fontes.

A Empresa A é uma empresa situada em Portugal. Atualmente, atua em quatro unidades de negócio, ilustradas na Figura 4.2, e tem como principal missão lutar pela satisfação de cada cliente, através da melhoria contínua da qualidade dos serviços prestados.

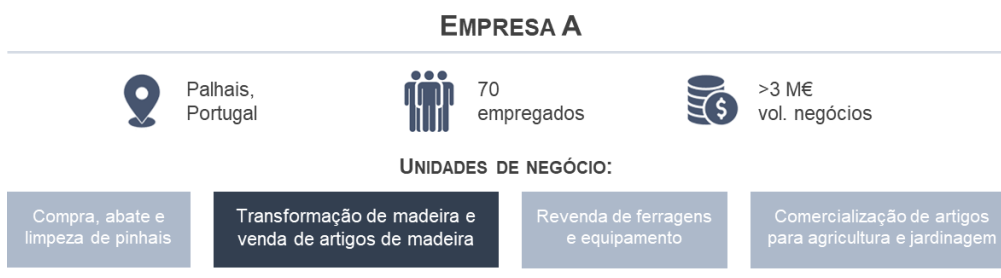


Figura 4.2 – Apresentação da Empresa A.



Este trabalho foi desenvolvido na unidade de transformação de madeira (destacada na Figura 4.2) que constitui a génese da empresa e apresenta uma parte significativa do seu volume de negócios, através da produção de vários produtos. As instalações da unidade transformadora da Empresa A ocupam 24 000 metros quadrados e são constituídas por dois parques de entregas e de m-p, secções de transformação e tratamento de madeira, secções de aproveitamento de subprodutos, armazéns e loja. O *layout* simplificado está ilustrado Figura 4.3, onde estão destacadas as secções relevantes para o caso de estudo.

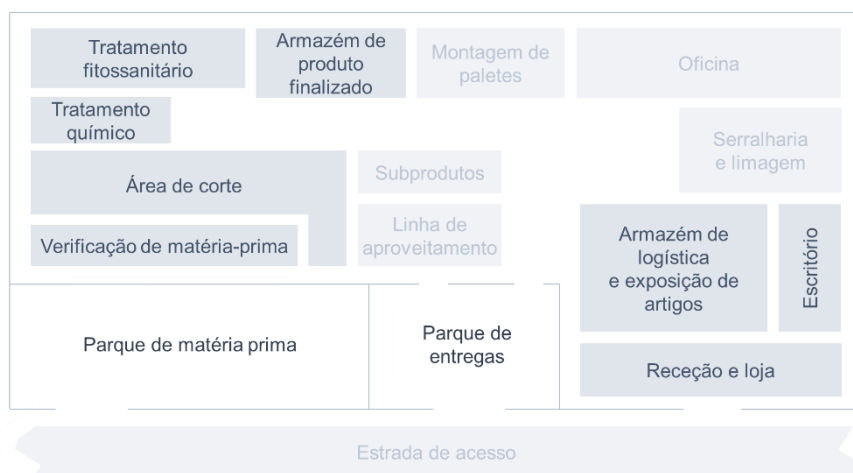


Figura 4.3 – *Layout* simplificado da unidade de transformação de madeira da Empresa A.

Tendo base no pensamento lean, Machado [82] realizou um diagnóstico à unidade de transformação de madeira da Empresa A, através do qual chegou a uma lista de *pain-points*, problemas e oportunidades de melhoria. Esta informação foi simplificada e complementada, resultando na lista abaixo (Tabela 4.1). O objetivo é estudar de que modo o design e desenvolvimento de soluções de CPS poderia ajudar a mitigar algumas destas dificuldades.

Tabela 4.1 – Problemas e oportunidades de melhoria gerais da Empresa A.

PROBLEMAS E OPORTUNIDADES DE MELHORIA GERAIS	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ineficiências no transporte de m-p</li> <li>• Grandes quantidades de retrabalho</li> <li>• Tempo de ciclo superior ao <i>takt time</i><sup>12</sup></li> <li>• Largos tempos de espera entre processos</li> <li>• Baixa disponibilidade das máquinas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Baixa produtividade<sup>13</sup></li> <li>• Grande quantidade de desperdícios</li> <li>• Problemas de comunicação entre setores</li> <li>• Incapacidade de satisfação da procura de artigos personalizados</li> </ul>

O projeto de CPSDD tem o objetivo de desenvolver um CPS que atue na melhoria da execução da Empresa A e do seu sistema produtivo de forma mais eficaz e eficiente, segundo o seu BM (pré-estabelecido), e não necessariamente alterar a forma como a empresa lida com o mercado. Não se pretende reformular o modo como a Empresa A responde ao mercado ou de como deve ser a relação com fornecedores ou parceiros, mas sim desenvolver soluções de CPS que ajudem à concretização dessas interações de uma forma mais eficiente.

A fim de tornar o impacto do CPSDD no mais significativo e visível possível, faria sentido o projeto

<sup>12</sup> O *takt time* é a unidade de tempo dentro da qual um produto deve ser produzido (taxa de fornecimento) para corresponder à taxa na qual esse produto é necessário (taxa de demanda) [93].

<sup>13</sup> A produtividade é um rácio que mede quão bem uma organização converte recursos em bens ou serviços [94].

concentrar-se primeiramente na VC da família de produtos<sup>14</sup> com maior representação na unidade de transformação de madeira. Esta inclui ripas, barrotes, tábuas e paletes e a lógica da sua VC está esquematizada na Figura 4.4. O processo começa com a introdução de uma ordem de encomenda que o cliente pode realizar através de uma chamada telefónica ou presencialmente na loja. As ordens de encomenda são manualmente registadas pelo controlo de produção e comunicadas aos supervisores de produção. Estes verificam a existência da m-p adequada em parque, para a concretização da ordem de encomenda, a qual, se não estiver disponível, informam o sector do pinhal para proceder à recolha da m-p necessária e efetuar a sua entrega ao parque. Posteriormente, é feita a verificação (1) que consiste numa inspeção de toda a m-p a corpos estranhos que possam danificar a linha de produção. Depois, os troncos são transportados para a área do processo de corte (2), que se divide em quatro subatividades: remoção da casca de pinheiro das toras para não danificar as serras de corte; corte em largura; corte em comprimento; e corte em espessura. Após serem cortados, os produtos sofrem duas fases de tratamento, um tratamento químico protetivo (3) e um tratamento de calor fitossanitário (4). Apesar do processo produtivo ser maioritariamente puxado pelas ordens de encomenda, uma parte da produção segue para stock de exposição e de segurança, de modo a satisfazer pedidos de menor dimensão imediatamente, ou casos de urgência, ou situações em que a produção não consiga ir ao encontro do pedido, em tempo útil. Atualmente, tanto o controlo como a supervisão da produção são realizados de forma manual e tradicional, utilizando-se o telemóvel para fazer apenas chamadas para unidade de abate e limpeza de pinhais e receber encomendas dos clientes. Nota: descrições mais detalhadas das diferentes etapas da VC encontram-se no Anexo D.

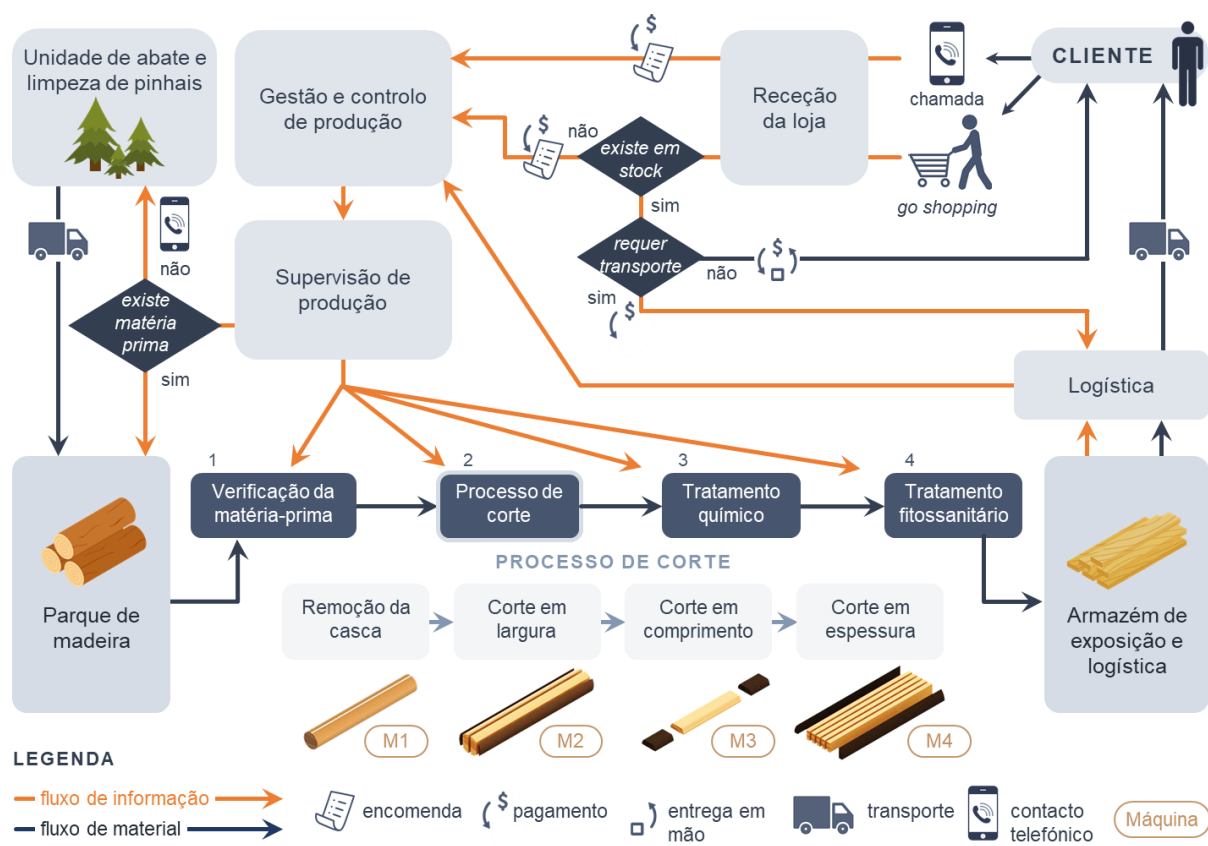


Figura 4.4 – Mapeamento esquemático da VC atual da família de produtos selecionada.

<sup>14</sup> Uma família de produtos é um grupo de produtos que passa por etapas semelhantes de processamento e utiliza equipamentos comuns nos seus processos [95].

### 4.3. DESIGN CONCEPTUAL DE CPS

Similarmente ao que acontece em PDD [77], a proposta de metodologia de CPSDD, na projeto de design e desenvolvimento macro-conceptual, inclui uma fase preliminar de Planeamento de projeto, recebendo também a designação “zero” por anteceder a aprovação do projeto.

#### 4.3.1. ETAPA 1 – IDENTIFICAÇÃO DE OPORTUNIDADES DO BM

A Fase 0 inicia-se com esta primeira etapa, que consiste em cinco passos, esquematizados na Figura 4.5 e detalhados na página E do Anexo C.

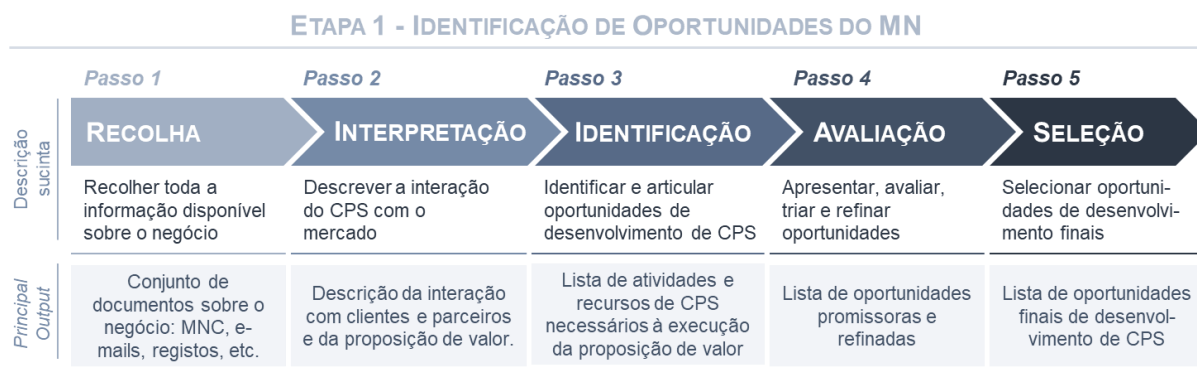


Figura 4.5 – Passos e principal *output* da Etapa 1.

No contexto do projeto de CPSDD da Empresa A, a elaboração dos passos 1 e 2 poderia resultar em descrições como as seguintes: existe a oportunidade de o CPS da Empresa A suportar o fabrico e a venda de artigos de madeira a vários segmentos de clientes. Existe também a oportunidade de o CPS vir a facilitar o processo de elaboração de encomendas de produtos standard e de produtos personalizados, além de facilitar a recolha de informação destas encomendas. O BM indica também a oportunidade de desenvolvimento do acesso a informação sobre qual o estado da concretização da produção e da entrega. É também vendido o serviço de transporte da encomenda, pela logística da empresa ou pela subcontratação de um parceiro logístico, operações que devem também ser facilitadas pelo CPS.

Subsequentemente, seguindo as linhas da metodologia do passo 2.3, poder-se-ia concluir que o CPS deverá alavancar a proposta de valor que, a par da variedade de oferta da família de produtos e da conveniência de poder facilmente personalizar os artigos, inclui também a facilidade de elaboração e entrega de encomendas, a facilidade de pagamento e cancelamento de encomendas, a garantia de um *lead time* reduzido adaptado ao desejo do cliente, garantia de qualidade de fabrico e tratamento dos artigos, e garantia de um preço competitivo na venda dos artigos e do serviço de entregas. O BM pretende concretizar esta proposição de valor através de um sistema produtivo mais informado, preciso e reativo, que responde melhor aos desenvolvimentos e problemas. Depois de se estudar as diferentes atividades e recursos chave para o efeito, articularam-se várias declarações de oportunidades de desenvolvimento de CPS, formulando uma lista inicial.

Finalmente, após a aplicação dos passos 4 e 5, chegar-se-ia ao *output* da Etapa 1 (Tabela 4.2). Poderiam existir outras oportunidades e abordagens aos passos propostos: este *output* é apenas um exemplo de um conjunto de oportunidades de CPSDD. Esta lista demonstra ser importante para o planeamento de projeto. É um primeiro esboço que define algumas janelas de ação, garantindo assim que o projeto está alinhado com o BM desde o início. Adicionalmente, este esboço facilita a elaboração da declaração de missão, na Etapa 2.

Tabela 4.2 – Declarações finais de oport. de CPSDD, por ordem de prioridade (E1 – P4 e P5).

NÍVEL C	OPORTUNIDADES DE DESENVOLVIMENTO
Cognição	Possibilitar a supervisão descentralizada do processo produtivo e de cada uma das suas partes, e de operações envolvidas como o abastecimento de m-p ou a logística nas implantações
Conteúdo	Possibilitar a disponibilização da informação sobre o stock para venda disponível no armazém da loja e da m-p disponível em parque
Cliente	Desenvolver a capacidade de satisfazer vários pedidos de pequenas quantidades, de múltiplos clientes e de forma flexível no prazo estabelecido
Coalizão	Possibilitar a capacidade de adaptação das máquinas na linha de produção, a fim de produzir os artigos personalizados de maneira flexível e oportuna
Conteúdo	Possibilitar a disponibilização da informação sobre a m-p disponível em parque
Cognição	Desenvolver ferramentas de análise dos resultados de cada posto de trabalho, máquina, ou linha de produção, processo e operação
Cognição	Desenvolver a capacidade de identificação de erros, pontos críticos de baixa performance, problemas e desperdícios no processo produtivo e nas operações de logística
Cliente	Desenvolver uma ferramenta na internet que facilite a realização de encomendas e a personalização dos artigos de madeira desejados
Coalizão	Desenvolver uma ferramenta que atualize automaticamente os dados de encomenda na base de dados, informando automaticamente o controlo de produção
Cliente	Desenvolver uma ferramenta que facilite a apresentação do catálogo de artigos standard e a divulgação da oferta
Cognição	Desenvolver ferramentas de apoio à tomada de decisão e à priorização de tarefas
Cliente	Possibilitar a capacidade de notificar os clientes sobre o progresso da produção

### 4.3.2. ETAPA 2 – PLANEAMENTO DE PRÉ-PROJETO

Após ter sido obtida uma lista de oportunidades de desenvolvimento, a etapa seguinte consiste no planeamento de pré-projeto de CPS. O prefixo “pré” é utilizado porque o planeamento de projeto propriamente dito é realizado na Etapa 9. Esta Etapa 2 consiste em quatro passos, que estão esquematizados na Figura 4.6 e detalhados na página F do Anexo C.

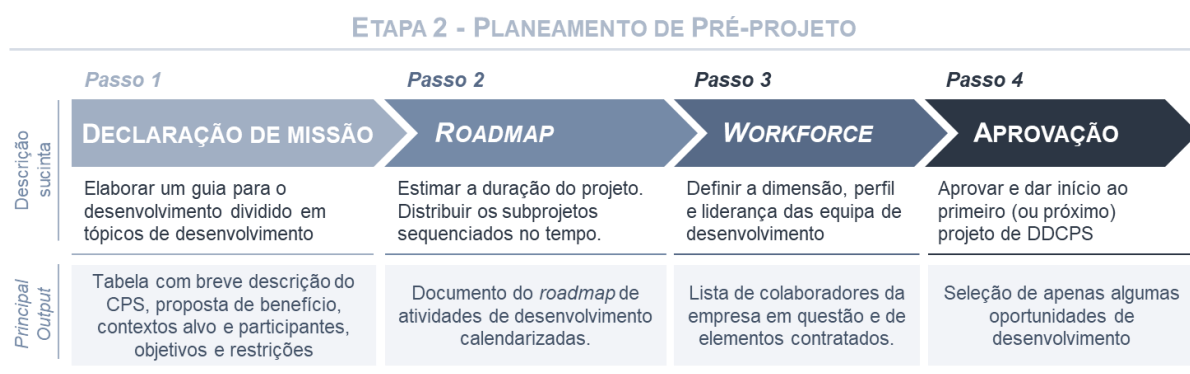


Figura 4.6 – Passos e principal *output* da Etapa 2.

Na fase de planeamento de projeto de CPSDD da Empresa A, a elaboração da Declaração de Missão poderia resultar num documento como o apresentado na Tabela 4.3 (página seguinte). Neste exercício, fez sentido agrupar algumas das oportunidades declaradas na Tabela 4.2, resultando nos nove tópicos apresentados. Seguidamente, os outputs dos passos 2 e 3 poderiam resultar num documento com o formato do exemplo apresentado na Figura 4.7. Os intervalos de tempo e os *milestones*

(losangos na figura) foram esboçados consoante indicações que a Empresa A poderia eventualmente apresentar. A definição dos *milestones* no cronograma irá assim orientar e salientar a urgência do sub-projeto e as metas a considerar, o que é importante para garantir ritmo nos trabalhos e assegurar mais tarde o cumprimento de objetivos. Este planeamento é útil, uma vez que a Empresa A, sozinha, tem dificuldade em estimar o tempo dos desenvolvimentos.

Assim, a Etapa 2 demonstra ser útil para alavancar um início de projeto orientado. Através da articulação de oportunidades de desenvolvimento e da identificação dos respetivos contextos alvo, dos participantes, do ponto de partida e das restrições de projeto, são estabelecidas as janelas de ação e mais célere e eficaz (Etapa 3). Após a elaboração da missão e dos planeamentos deve ser realizada a aprovação formal do projeto, dando-se início ao primeiro projeto de CPSDD, que irá desenvolver o CPS 1.0, iniciando-se, depois, a fase de desenvolvimento de conceitos para as respetivas janelas de oportunidade.

Concluindo a Fase 0, ficou demonstrado que a abordagem inicial ao CPSDD mais lógica não é *top-down* mas sim *bottom-up*. Ou seja, não se deve partir do pressuposto que a empresa necessita de todas as capacidades que um CPS pode oferecer e, portanto, não se deve iniciar um projeto de CPSDD puxando de imediato por tecnologias disponíveis, como robôs ou AR. A abordagem mais lógica é partir da identificação de oportunidades de desenvolvimento, alinhadas pelo BM, para identificar as janelas de ação adequadas para os recursos da organização. Adicionalmente, salientou-se que mesmo depois de se identificarem algumas oportunidades de desenvolvimento (subprojetos), pode ser impensável uma organização atender simultaneamente a todos os aspetos que suscitam desenvolvimentos. Logo, é importante agrupar os subprojetos em diferentes projetos de CPSDD escalonados no tempo, conforme as prioridades e urgências, adaptando a exigência dos desenvolvimentos à capacidade limitada de recursos da organização.

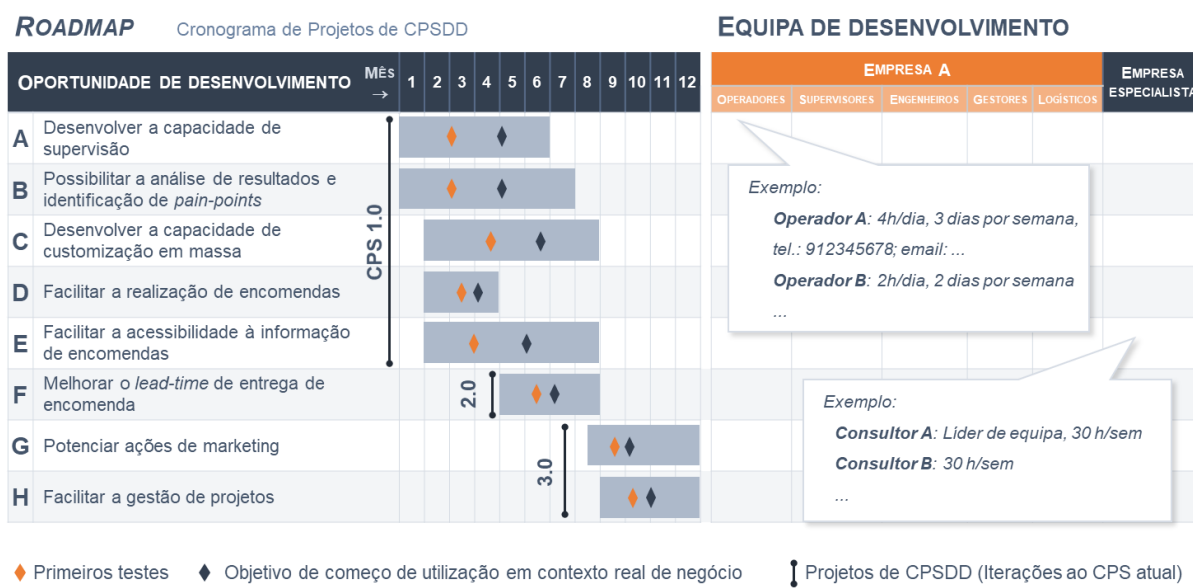


Figura 4.7 – Exemplo de formato de planeamento do *Roadmap* e da Equipa (E2 – P2 e P3).

Tabela 4.3 – Declaração de Missão do Projeto de CPSDD da Empresa A (E2 – P1).

<b>DECLARAÇÃO DE MISSÃO</b>		<b>OBJETIVO GERAL – elaborar o design e desenvolver um sistema ciber físico que execute os processos e operações relativos à VC da família de artigos de madeira selecionados, de forma mais eficaz e eficiente, segundo o BM da Empresa A.</b>			
<b>CPSDD QUE...</b>	<b>PROPOSTA DE BENEFÍCIO</b>	<b>OBJETIVOS</b>	<b>CONTEXTOS ALVO</b>	<b>PARTICIPANTES</b>	<b>PONTO DE PARTIDA E RESTRIÇÕES</b>
<b>A. Possibilite a supervisão do processo produtivo e operações envolvidas</b>	Supervisão descentralizada do processo produtivo e de cada uma das suas partes, e de operações envolvidas como o abastecimento de m-p ou a logística na fábrica	Obter o conhecimento geral do processo para facilitar a gestão	Todos os contextos produtivos, armazenamento, logísticos, relação com parceiros, clientes, etc.	Todos os participantes internos e externos	Atualmente, nos processos não existe qualquer suporte tecnológico. Apenas a equipa de gestão tem <i>laptops</i> e <i>smartphones</i> pessoais em uso para a empresa. Existe um registo manual de ocorrências e problemas numa ficha, mas é pouco regular. As análises são feitas manualmente e com as funções básicas do Microsoft Excel. A eficiência na comunicação com parceiros é ponto chave
<b>B. Possibilite a análise de resultados e identificação de <i>pain-points</i></b>	Ferramentas de análise dos resultados de cada posto de trabalho, máquina, linha de produção, ou processo como um todo, que alavancam a capacidade de identificação de erros, pontos críticos de baixa performance, problemas e desperdícios no processo produtivo e nas operações envolvidas	Intensificar a identificação de oportunidades de melhoria	Processos produtivos, verificação de m-p, etapas do processo de corte, tratamentos, deslocação de madeira, stocks acumulados, <i>setups</i> , <i>down-time</i> das máquinas, tempos de espera etc.	Operadores, engenheiros, supervisores, designers, manutenção, responsáveis pela qualidade, logística, etc.	
<b>C. Possibilite a customização em massa</b>	Capacidade de satisfazer vários pedidos de pequenas quantidades, de múltiplos clientes e de forma flexível, adaptando as máquinas na linha de produção, assim como as operações envolvidas na VC, a fim de produzir artigos de madeira de tamanhos e feitios standard ou personalizados de forma flexível e oportuna	Atingir flexibilidade de produção que possibilite o aumento da variedade da oferta de artigos	Processos produtivos (ver ponto 4), operações necessárias, como o fornecimento e armazenamento de m-p, operações de controlo de produção, logística nas implantações, a elaboração e registo de encomendas, etc.	Engenheiros, operadores, supervisores. Fornecedores, gestores, logísticos, lojistas, atendedores de chamadas, responsáveis pelo marketing, clientes	Impossibilidade de investir em novas máquinas.
<b>D. Facilite a realização de encomendas e a personalização de artigos de madeira</b>	Ferramenta que facilite a realização de encomendas e a personalização dos artigos de madeira desejados; esta ferramenta deve também atualizar automaticamente os dados de encomenda na base de dados, informando automaticamente o controlo de produção	Tornar o processo de realização de encomendas mais apelativo e conveniente, resultando em mais vendas	Relação com o cliente; realização de encomenda; atendimento ao cliente: através do telefone ou presencialmente em loja.	Cliente, registador da encomenda	Todas as elaborações de encomendas requerem as ações e disponibilidade de um colaborador. Atualmente, são feitas via telefone ou na loja. Os recursos humanos para esta atividade são escassos. Pretende-se automatizar este processo, através do autoatendimento do cliente. Não existe atualmente qualquer plataforma para o efeito, mas existe algum capital para investir nesta vertente. A prioridade é alta
<b>E. Facilite a atualização e conhecimento de informação de encomendas</b>	Ferramenta que atualize automaticamente os dados de encomenda na base de dados, informando automaticamente o controlo de produção	Maior organização que potencia melhor planeamento	Receção, loja, atendimento de chamadas, registo de informação	Registadores de encomendas, atendedores de chamadas, gestão da produção	
<b>F. Possibilite um melhor <i>lead-time</i> de encomenda</b>	Capacidade de executar o ponto 1 no prazo estabelecido, com margem de segurança	Aumentar produtividade e reduzir tempos. Reduzir o <i>lead time</i> para um terço	Todas as atividades desde o registo da encomenda até a entrega da mesma	Todos os intervenientes internos e externos, desde o fornecedor, ao operador e ao gestor	Inventário excessivo entre processos, tempo de espera e transporte interrompidos. <i>Lead time</i> de encomenda atual é de 3 a 4 dias. Não existe fluxo contínuo entre processos. Os diferentes processos funcionam como ilhas isoladas onde o fluxo contínuo não é desenvolvido
<b>G. Potencie ações de marketing</b>	Ferramenta que facilite a apresentação do catálogo de artigos standard e a divulgação da oferta	Aumentar as vendas	Contexto de vendas, de catalogação, de divulgação	Gestores de marketing, gestão de produção	Não existe nenhum colaborador formalmente alocado ao marketing. A estratégia de marketing existe mas os canais de alcance são pouco eficientes e o serviço de suporte é quase inexistente. Prioridade média alta
<b>H. Facilite a gestão de projetos</b>	Ferramentas de apoio à tomada de decisão e à priorização de tarefas	Potenciar ações de gestão	Gestão e supervisão da produção, contextos produtivos	Gestores e supervisores de projeto e produção	As ações de controlo de gestão atuais são de modo tradicional e pouco rigorosas

Apesar de na Fase 0 se realizar um trabalho importante de compreensão do modelo de negócio, de identificação de oportunidades para o desenvolvimento de CPS e de planeamento de projetos de CPSDD, a Fase 0 não é suficiente para chegar às necessidades da empresa. É por isso que no projeto de design conceptual se propõe incluir a Fase I de PDD [77], onde é realizado um estudo devidamente minucioso à realidade dos contextos e atividades da organização em causa, com o objetivo de compreender com o maior detalhe possível que recursos de CPS é que são necessários.

O desenvolvimento de conceitos de CPS é a primeira fase após a aprovação e lançamento do projeto de CPSDD. Assim como é sugerido na Fase I de PDD [77], a Fase I de CPSDD é de carácter iterativo. Isto é, à medida que se vai desempenhando cada etapa, pode surgir mais informação relevante, que não foi percebida antes, ou que é resultante do trabalho de aprofundamento dos diferentes tópicos. Muitas vezes pode ser necessário regressar atrás para refazer os passos de uma certa etapa, refinando os respetivos *outputs*. Além de voltar atrás poder ser normal, mais recorrente pode ser a necessidade de acoplar etapas (ver nota de rodapé na página 42), como o leitor poderá averiguar nos subcapítulos seguintes.

### 4.3.3. ETAPA 3 – IDENTIFICAÇÃO DE NECESSIDADES

A Fase I inicia-se com esta terceira etapa, que consiste em quatro passos, esquematizados na Figura 4.8 e detalhados na página G do Anexo C.

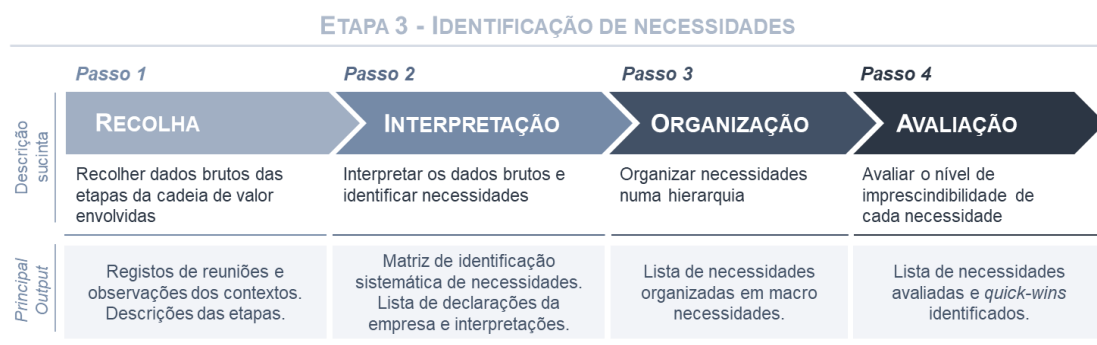


Figura 4.8 – Passos e principal *output* da Etapa 3.

Esta etapa deve ter como ponto de partida um conjunto pequeno de oportunidades de desenvolvimento (*output* da Etapa 2). O objetivo agora é transformar estas oportunidades em necessidades da organização, realizando uma Identificação de necessidades da empresa completa, detalhada e realista, a fim de nas etapas seguintes se alavancar um desenvolvimento de conceitos justificados, lógicos e necessários, alinhados com os resultados da declaração de missão. Isto porque não é possível desenvolver conceitos de soluções realmente necessárias sem primeiro identificar os problemas que requerem essas soluções. Cada conceito tem de ter uma justificação na satisfação de necessidades reais sentidas na produção e operações.






Após a aprovação formal do primeiro projeto de CPSDD da Empresa A, a Recolha (Passo 1) deveria realizar-se minuciosamente através de várias reuniões da Equipa de Desenvolvimento e eventuais observações dos processos em atividade no chão de fábrica das implantações, de onde resultariam vários registos de informação. Não obstante, tendo o colega Machado [82] realizado um diagnóstico integral aos processos, essa informação foi simplificada, servindo de base para a elaboração do Passo 2. Assim, neste segundo passo, as atividades da VC esquematizadas anteriormente na Figura 4.4, foram agrupadas em cinco etapas (e) e as respetivas descrições detalhadas estão incluídas no

Anexo D. Propõe-se que a interpretação da informação recolhida (Passo 2) seja realizada através da identificação sistemática de necessidades, mediante o estudo das necessidades de cada etapa da VC (referidas na Tabela 4.4) ao longo das cinco dimensões da respetiva produção e respetivas operações. Estas cinco dimensões são os “cinco P’s da gestão de operações” [83], referidos sucintamente e ilustrados na Tabela 4.5, e explicados em detalhe na página H do Anexo A. Assim, este segundo passo poderia resultar nos *outputs* apresentados na Tabela 4.5 e na Tabela E – 1.

Tabela 4.4 – Descrições resumidas das etapas (e) da VC organizadas para a E3 – P2.

#	ETAPA (e)	DESCRIÇÃO CURTA (MAIS DETALHE NO ANEXO B)
1	Entrada de encomendas	Registo de pedidos, verificação de inventário e registo de encomendas.
2	Fornecimento de m-p	Fornecimento, verificação de m-p e alimentação da mesma no processo de corte.
3	Processo de corte	Remoção da casca, corte em largura, corte em comprimento, corte em espessura.
4	Tratamento	Tratamento químico e tratamento fitossanitário.
5	Armazenamento e entrega	Armazenamento de inventário e realização de entregas.

Tabela 4.5 – Matriz de identificação sistemática de necessidades da Empresa A (E3 – P2).

OPORTUNIDADES DE CPSDD											
						PEOPLE	PLANTS	PARTS	PROCESSES	PLANNING	
						PESSOAS	IMPLANTAÇÕES	MATERIAIS	EQUIPAMENTOS	INFORMAÇÃO	
	ETAPAS DA VC	A	B	C	D	E					
e1	Entrada de encomendas	x	x	x	x	x	ABCDE	ABE	-	ABCDE	ABCDE
e2	Fornecimento de m-p	x	x				AB	AB	AB	AB	AB
e3	Processo de corte	x	x	x			ABC	ABC	ABC	ABC	ABC
e4	Tratamento	x	x				AB	AB	AB	AB	AB
e5	Armazenamento e entrega	x	x				AB	AB	AB	AB	AB

Na Tabela 4.6 abaixo, é apresentado um exemplo do que poderia ser uma declaração da Empresa A e a respetiva interpretação de necessidades de CPS (retirado da Tabela E – 1 / Anexo E). No total, foram interpretadas 41 necessidades de CPS (ver Tabela E – 1 no Anexo E).

Tabela 4.6 – Exemplo de interpretação de necessidades de CPS (E3 – P2).

DECLARAÇÃO DA EMPRESA A		NECESSIDADES DE CPS INTERPRETADAS
e1 - ENCOMENDAS	<i>Os colaboradores de controlo de produção necessitam do conhecimento de informação em tempo real sobre todos os detalhes de cada venda imediata em loja, venda por encomenda e do inventário disponível em armazém. Necessitam também de analisar de forma inteligente os dados das encomendas para planear devidamente o fornecimento de matéria prima (e2), o processo de transformação da mesma (e2,3,4), o armazenamento e entregas (e5).</i>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. O CPS disponibiliza informação, em tempo real, relativa aos pedidos de artigos: quantidade, tipo de madeira, dimensões, urgência, contactos e morada do cliente.</li> <li>2. O CPS proporciona ao controlo de produção a capacidade de análise inteligente aos dados de encomendas.</li> <li>3. O CPS proporciona ao controlo de produção a capacidade de planeamento das operações e da produção.</li> </ol>

Por conseguinte, propõe-se agora que o passo seguinte consista na organização desta informação, de forma hierárquica. Seguindo os subpassos do Passo 3 da Etapa 3, e aplicando a lógica da árvore de exploração de conceitos do Passo 4 da Etapa 5, ambos descritos no Anexo A, o *output* dos Passos 3 e 4 poderia resultar no exemplo da Tabela E – 2. O tratamento e organização da informação resultou em 32 micro-necessidades, distribuídas em sete macro-necessidades de CPS (ver Tabela 4.7). Importa



salientar que as sete macro-necessidades escolhidas constituem apenas um exemplo de abordagem de categorização, podendo haver muitas outras soluções para este exercício. No desenrolar do Passo 4, a pontuação atribuída na avaliação das diferentes necessidades permitiria iniciar um desenvolvimento de conceitos melhor orientado, com prioridades estabelecidas, uma vez que agora se tem em consideração quais são os atributos de CPS imprescindíveis para a Empresa A. De facto, todas as necessidades enumeradas são desejáveis à Empresa A, quase todas são úteis, algumas são necessárias, mas poucas são imprescindíveis. Note-se também que, nesta tarefa de avaliação, se teve em consideração as dependências entre esses atributos. Por exemplo, a macro necessidade “Análise e apoio à decisão” (VI) depende da “Disponibilização de informação (I)” que, por sua vez, depende em parte da “Possibilitação do registo manual de informação” (II). É por isso que a (micro) necessidade 9 tem nota “5” (ver Tabela E – 2), uma vez que é condição necessária para a necessidade 1, que também tem nota “5”, ser possível.

Tabela 4.7 – Macro-necessidades e respetivas micro-necessidades de CPS (E3 – P3).

#	MACRO-NECESSIDADE DE CPS	RESPECTIVAS NECESSIDADES (TABELA E – 2)
I.	<b>Disponibilização de informação</b>	O sistema de informação do CPS tem de cobrir as necessidades 1 a 8.
II.	<b>Possibilitação do registo manual de informação</b>	As interfaces do CPS têm de cobrir as necessidades 9 a 14.
III.	<b>Suporte e facilitação da comunicação</b>	O sistema de comunicação do CPS tem de cobrir as necessidades 15 a 17.
IV.	<b>Monitorização</b>	O sistema de recolha e tratamento de dados e o sistema de informação do CPS tem de cobrir as necessidades 18 a 22.
V.	<b>Deteção e aviso de irregularidades</b>	O sistema de recolha e tratamento de dados e o sistema de alerta do CPS tem de cobrir as necessidades 23 e 24.
VI.	<b>Análise e apoio à decisão</b>	O sistema de tratamento de dados e as ferramentas de análise do CPS têm de cobrir as necessidades 25 a 30.
VII.	<b>Facilitação do planeamento</b>	O sistema de tratamento de dados e as ferramentas de planeamento do CPS têm de cobrir as necessidades 31 e 32.

#### 4.3.4. ETAPA 4 – ELABORAÇÃO DE ESPECIFICAÇÕES ALVO

Tendo-se chegado a um conjunto de necessidades prioritárias, a proposta de metodologia prossegue com a quarta etapa, que consiste em dois passos descritos sucintamente na Figura 4.9 e detalhados na página I do Anexo C.

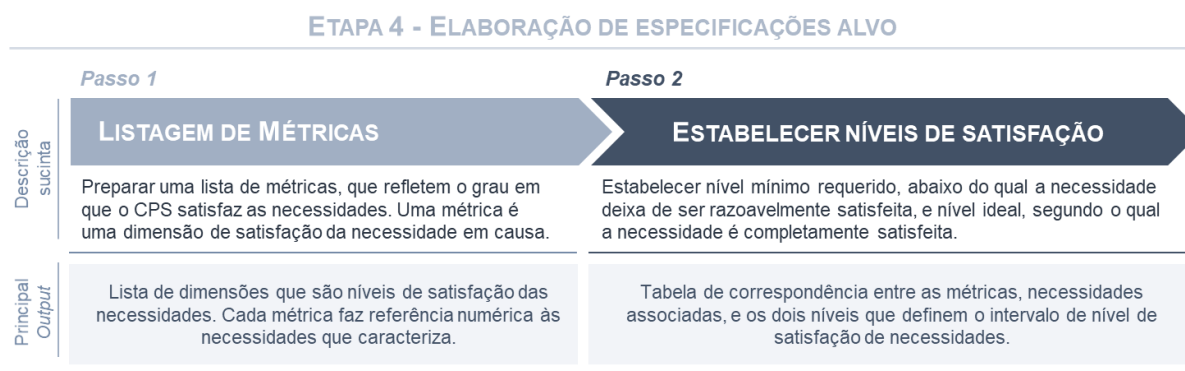


Figura 4.9 – Passos e principal *output* da Etapa 4.

Numa primeira abordagem ao Passo 1 da Etapa 4, faria sentido que a Empresa A considerasse, numa primeira iteração do projeto CPS 1.0, apenas os recursos imprescindíveis (Tabela E – 2), cuja prioridade de desenvolvimento é máxima, e os *quick-wins* com prioridade no mínimo elevada. Ou seja, mesmo dentro do Projeto CPS 1.0 (ver Figura 4.7), faria sentido alavancar Projetos CPS 1.1, 1.2, etc., visto que alavancar todos os recursos de uma só vez pode ser inviável, mas todos eles são desejados ou necessitados pela Empresa A. Assim, as 14 necessidades que foram estudadas no Passo 1 são as apresentadas na Tabela E – 3, onde se coloca a correspondência numérica das tabelas anteriores, para que não se perca informação. Estas 14 necessidades estão também na Tabela 4.8, onde é apresentada o que poderia ser a correspondência entre as mesmas e as métricas, que não são mais que dimensões ou graus de satisfação das necessidades. O leitor poderá notar que as métricas (ver Tabela 4.9) são essencialmente qualitativas. Ao contrário do que se faz na elaboração de especificações alvo num PDD [77] genérico, onde a maior parte das métricas são quantitativas e objetivas, o que se propõe, na presente metodologia, é elaborar um conjunto de métricas qualitativas e subjetivas que ajudem no design e desenvolvimento de conceitos de CPS. A razão para esta opção é o design e desenvolvimento de um produto que é um CPS. Ora, um CPS é, por definição, um sistema de sistemas ou, por outras palavras, é um sistema composto por vários produtos, que por sua vez podem ser compostos por outros subprodutos e assim sucessivamente. Assim, as especificações quantitativas, tecnológicas, de informática, eletrotécnica, computadores, etc. são obviamente necessárias para as Fases II, III, IV e V do design de cada “produto” de cada sistema do CPS. Essas especificações são necessariamente mais objetivas, além de física e tecnologicamente mensuráveis. Porém, como está explicado no subcapítulo 4.1, o objetivo desta dissertação, e da exemplificação do caso de estudo, é demonstrar que faz sentido aplicar a lógica das primeiras três fases de PDD [77] ao nível macro e conceptual do CPS. É por isso que as métricas apresentadas na Tabela 4.9 são níveis qualitativos de satisfação da necessidade em causa. De facto, faria sentido que o termo “métrica” fosse substituído por “dimensão de satisfação da necessidade” ou “grau de satisfação da necessidade”, porém mantém-se o termo para fazer jus ao PDD [77].

Tabela 4.8 – Matriz de correspondência entre necessidades e métricas.

		MÉTRICAS (TABELA 4.9)													
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11			
NECESSIDADES	Disponib. de info. sobre a demanda de artigos	1	x	x	x	x	x								
	Disponib. de info. de inventário de artigos p/ venda em armazém	2	x	x	x	x	x								
	Possib. do registo dos pedidos na loja	3						x	x						
	Possib. do registo das entradas e saídas de artigos no armazém	4						x	x						
	Possib. do registo manual das encomendas, produtos std e pers.	5						x	x						
	Possib. do registo manual das entradas e saídas de m-p	6						x	x						
	Possib. do registo manual de problemas na produção	7						x	x						
	Suporte à comunicação entre o c. prod. e participantes na VC	8								x					
	Suporte à comunicação no processo de corte e transporte	9								x					
	Monitorização da posição das ferr. nos processos de corte	10									x				
	Deteção e aviso de irregularidades na alimentação de m-p	11									x				
	Análise inteligente aos problemas	12										x			
	Facilit. do plan. das operações (fornecimento de m-p e logística)	13												x	
	Facilit. do plan. da produção (processos de corte e tratamento)	14													x

Tabela 4.9 – Lista de níveis estabelecidos para as métricas (E4 – P2).

N	M	MÉTRICA (DIMENSÃO)	NÍVEL IDEAL (+)	NÍVEL MÍNIMO REQUERIDO (-)
1, 2	1	Nível de detalhe da informação	Todos os campos de dados essenciais e úteis para a operação em causa.	Campos de dados essenciais para a operação em causa.
1, 2	2	Nível de automatização da atualização de dados no IS	Atualização automática e em tempo real.	Atualização manual.
1, 2	3	Nível de abrangência geográfica da disponibilização da informação	Todos os locais relacionados com a operação em causa.	Locais essenciais para a operação em causa.
1, 2	4	Nível de estruturação e organização da informação	Estrutura complexa, com a coleção organizada de valores de dados essenciais e úteis (M1), várias relações entre eles, e funções aplicadas automaticamente [84].	Estrutura simples com a coleção de valores de dados essenciais (M1) e algumas relações essenciais entre campos [84].
1, 2	5	Nível de tratamento e otimização da informação	Compatibilidade efetiva entre aplicativos, sistemas e tipos de dados; enriquecimento da informação através de combinações de fontes diversas; encriptação [85].	Facilitação do uso dos dados por HC e CC; proteção face a valores nulos, duplicados inesperados, indexação incorreta e formatos incompatíveis [85].
3 – 7	6	Nível de facilidade do registo dos dados	Ferramentas de registo automático de dados, com laser ou <i>QR Codes</i> , atualizando-os automaticamente para o IS, a partir de uma interface ergonómica, intuitiva e móvel.	Ferramenta de registo manual de dados para o IS a partir de uma interface.
3 – 7	7	Nível de abrangência geográfica do registo manual de dados	Todos os locais relacionados com a operação em causa.	Locais essenciais para a operação em causa.
8, 9	8	Nível de comunicação	Ferramenta que permita aceder a um espaço central de partilha de arquivos, planeamentos, decisões, etc.	Canais de comunicação básica (voz e media audiovisual) entre todos os colaboradores.
10, 11	9	Nível de sensorização, recolha de dados e monitorização	Utilização de muitas ou quase todas as medidas de <i>Smart Monitoring</i> (ver descrição da Tabela 2.1).	Dimensões e atributos físicos das ferramentas cuja informação é crucial.
12	10	Nível de funcionalidade de apoio à decisão	Ferramentas de apresentação de informação otimizada e tratamento visual, como <i>dashboards</i> ; ferramentas que facilitam avaliações dos objetivos face às alternativas de decisão.	Apenas apresentar a informação de forma estruturada e organizada.
13, 14	11	Nível de funcionalidade de apoio ao planeamento	Implementação de modelos e algoritmos avançados de <i>Smart Scheduling</i> (ver descrição da Tabela 2.1), que oferecem soluções otimizadas de procedimentos de fabrico.	Apresentação das atividades e procedimentos necessários para atingir o fim da operação em causa.

Prosseguindo com o Passo 2 da Etapa 4, a finalidade agora é estabelecer um intervalo de valores aceitáveis para cada métrica. Como foi referido, uma métrica traduz um grau de satisfação da necessidade em causa. Assim, este intervalo de valores é definido por um “valor” ou “nível” mínimo, abaixo do qual a necessidade deixa de ser razoavelmente satisfeita, e um nível ideal, que representa o grau segundo o qual a necessidade é completamente satisfeita. Estes limites e valores de referência estabelecidos para cada métrica definem assim as especificações alvo para guiar a Etapa 5 de geração, seleção e teste de conceitos. Em vez de “valor” utilizou-se a designação “nível”, por ser mais adequado para métricas qualitativas ou subjetivas. Finalizando a proposta de Etapa 4 da metodologia, no seguimento do caso de estudo, a elaboração dos níveis para as métricas elaboradas nas duas tabelas anteriores poderia resultar no *output* apresentado na Tabela 4.9. Para cada métrica (M) é estabelecido um nível aceitável e um nível ideal de satisfação das necessidades respetivas, que poderiam estar de acordo com as necessidades reais e do BM da Empresa A (N, #Tabela E – 3). Os intervalos foram baseados em todos os *outputs* reunidos até ao momento, especialmente nas declarações da Empresa

A e nas necessidades interpretadas (Tabela E – 1). Sublinhe-se, para que fique claro, que o “nível ideal” inclui a informação do “nível mínimo requerido”.

Ao realizar este exercício, surgiram algumas dificuldades que proporcionaram a chegada a algumas conclusões. Para estabelecer dois níveis que formam um intervalo, dentro do qual se pode agora, gerar conceitos de forma mais orientada e focada, foi necessária uma pesquisa considerável. Por um lado, um *brainstorming* (pesquisa interna), por outro uma pesquisa na literatura e artigos em portais de empresas (pesquisa externa). Na verdade, ambas as vertentes foram realizadas iterativa e acoplada-mente. Depois de elaborar as etapas seguintes, reparou-se que estas pesquisas são, de facto, características da Etapa 5 – Geração de conceitos, o que demonstra que a iteratividade e acoplagem inter-etapas desta Fase I, referida no início do subcapítulo 4.4, deve ser evidenciada no CPSDD, nomeadamente entre as Etapas 4 e 5. Isto é, estes passos da Etapa 5, de pesquisa interna e externa, devem ser utilizados na Etapa 4 de CPSDD. Eppinger e Ulrich, no seu livro [77], defendem até que os estudos de *benchmarking* devem ser feitos ao longo de todas as seis etapas da Fase I, mesmo na etapa anterior de Identificação de necessidades. Aí, na Etapa 3 de CPSDD, de facto, as identificações de necessidades de uma organização, se forem acompanhadas de um conhecimento e aprofundamento das melhores práticas (*benchmarking*), podem tornar-se abordagens mais elaboradas de identificação de necessidades. Isto porque, conhecendo algumas práticas relacionadas com o tópico em questão, e tendo algum conhecimento onde se pode incluir as disciplinas de *Smart Manufacturing* (Tabela 2.1), dos Conceitos Tecnológicos (Tabela 2.3) e das funcionalidades, componentes e requisitos de CPS (subcapítulo 2.2.2), é provável que se alcance mais perguntas, que uma vez respondidas, elevem o grau de aprofundamento das necessidades.

### 4.3.5. ETAPA 5 – GERAÇÃO DE CONCEITOS

A quinta etapa do CPSDD é a primeira onde o termo “conceito” surge pela primeira vez explicitamente. Até este ponto devem se ter discutido e esmiuçado as necessidades da organização, além dos níveis alvo de satisfação das mesmas, que introduzem implicitamente os conceitos de recursos de CPS necessitados pela organização. Assim como propõem Eppinger e Ulrich [77], nesta dissertação divide-se também esta etapa em quatro passos, que estão resumidos e esquematizados na Figura 4.10, e detalhados no Anexo C.

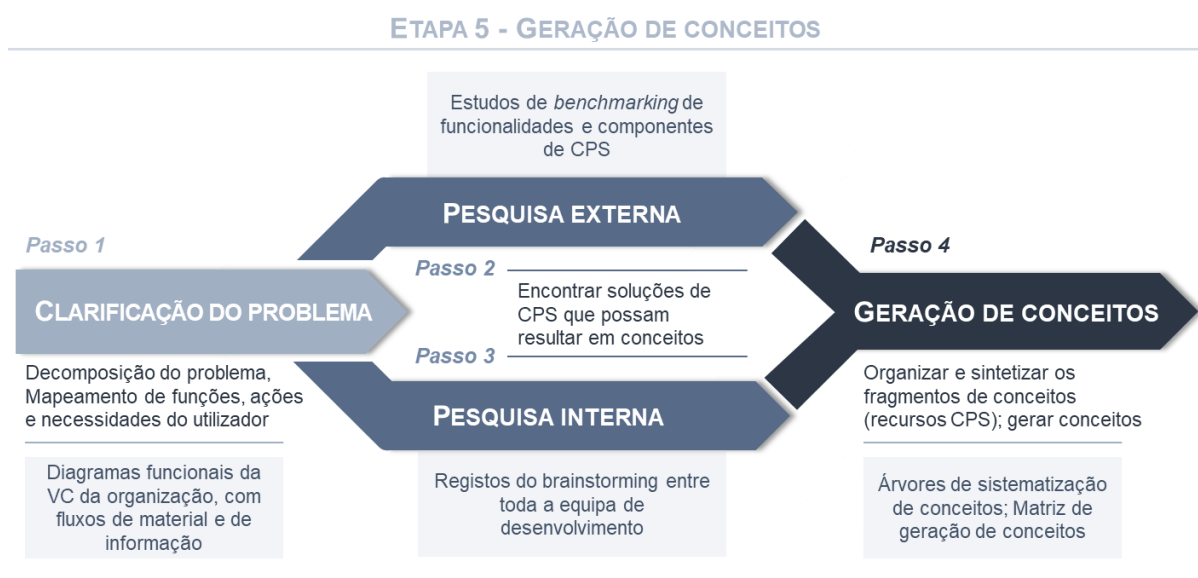


Figura 4.10 – Passos e principal *output* da Etapa 5.

Porém, num projeto de CPSDD, faz sentido que alguns destes princípios e métodos de PDD [77], referentes à Etapa 5, sejam utilizados ou até incorporados nas etapas anteriores. Com efeito, a Figura 3.1 sugere isso mesmo, que as Etapas 3, 4, 5 e 10 (entre outras) de PDD [77] sejam realizadas conjuntamente. Esta nuance também se aplica ao CPSDD. Se se observar novamente o diagrama apresentado na Figura 4.4, que foi utilizado na introdução e contextualização do caso de estudo, pode-se aferir que este é um diagrama funcional da VC da Empresa A, que inclui o mapeamento do fluxo de informações e de materiais, que constituem a gênese do problema de CPSDD. Analisando os *outputs* da Etapa 3, a identificação sistemática de necessidades da Tabela 4.5 é, de igual modo, uma decomposição do problema, de design de CPS, nas dimensões 5P, através da identificação de funções necessitadas pelas pessoas, processos, etc. O mesmo acontece na elaboração das métricas e dos intervalos de satisfação. Estes são vários exemplos do que poderiam ser os *outputs* do Passo 1 da Etapa 5. No final do subcapítulo anterior (4.3.4) é também referido que os métodos dos Passos 2 e 3 da Etapa 5, que estão ilustrados acima como sendo complementares e desempenháveis em paralelo, são muito úteis aquando a elaboração dos níveis alvo de satisfação de necessidades (Passo 2 da Etapa 4). Ou seja, todos estes *outputs*, na verdade, enumeram e caracterizam vários fragmentos de recursos de CPS que podem resultar em conceitos de CPS. Por conseguinte, o objetivo do Passo 4, que apesar de ter uma lógica diferente, adota o mesmo nome que o PDD [77], é explorar sistematicamente esses fragmentos de conceitos através das duas ferramentas que o PDD [77] propõe: a árvore de classificação de conceitos e/ou a tabela de combinações. Relativamente à árvore, as lógicas de comparação e de “poda” de fragmentos de CPS (explicada detalhadamente no Anexo A) já foi incluída no Passo 3 da Etapa 3, no processo de elaboração da Tabela E – 2. Quanto à tabela de combinações, na matriz da Tabela 4.10 é apresentada o que poderia ser uma combinação (ou seleção) de recursos de CPS e a geração de conceitos que dá nome à presente Etapa 5.

Tabela 4.10 – Matriz de geração de conceitos (E5 – P4)

N	RECURSO DE CPS	M				M				M				M				M			
		A	B	C		A	B	C		A	B	C		A	B	C		A	B	C	
1	Disponibilização de informação sobre a demanda de artigos	1	+	-	-	2	+	-	-	3	+	-	-	4	+	-	-	5	+	+	-
2	Disponibilização de info. de inventário de artigos p/ venda em armazém	1	+	+	-	2	+	-	-	3	+	-	-	4	+	-	-	5	+	+	-
3	Possibilitação do registo dos pedidos na loja	6	+	-	-	7	+	-	-												
4	Possibilitação do registo das entradas e saídas de artigos no armazém	6	+	+	-	7	+	-	-												
5	Possibilitação do registo manual das encomendas, produtos stand. e person.	6	-			7	-														
6	Possibilitação do registo manual das entradas e saídas de m-p	6	+	-	-	7	+	-	-												
7	Possibilitação do registo manual de problemas na produção	6	-	-	-	7	+	-	-												
8	Suporte à comunicação entre o controlo de produção e participantes na VC	8	+	-	-																
9	Suporte à comunicação no processo de corte e transporte	8	+	+	-																
10	Monitorização da posição das ferramentas nos processos de corte	9	+	-																	
11	Deteção e aviso de irregularidades na alimentação de m-p	9	+	-																	
12	Análise inteligente aos problemas	10	-	-																	
13	Facilitação do planeamento das operações (fornec. de m-p e logística)	11	+	-																	
14	Facilitação do planeamento da produção (processos de corte e tratamento)	11	+	-																	

Nas linhas estão dispostas as 14 necessidades (N, #Tabela E – 3) e ao longo das colunas mapearam-se as métricas (M) relacionadas. Diante de cada coluna M desenharam-se três colunas, uma para cada conceito (A, B e C) a ser gerado. No CPSDD da Empresa A poderia ser suficiente gerar apenas 3 conceitos, o que não significa que num outro projeto se devesse recorrer a uma maior granularidade. Em cada célula da matriz está populado o nível de satisfação pretendido de cada conceito para cada necessidade. Fazendo referência aos resultados apresentados na Tabela 4.9, são usados os símbolos “-” para o nível mínimo requerido e “+” para o nível ideal de satisfação. Nesta proposta de geração de conceitos, sugere-se ensaiar um conceito C muito simples, que não inclui todos os recursos, mas que a empresa vê ser muito acessível e de implementação bastante viável. Ou seja, este conceito mais simples reflete uma última triagem aos recursos de CPS, com base na sua imprescindibilidade, para levar definitivamente a cabo nas etapas seguintes.

Os processos de escrita deste subcapítulo e de elaboração do seu principal *output* (Tabela 4.10) permitiram que se chegasse a mais uma conclusão importante relativa à conjugação de Etapas propostas em PDD [77]. Só foi possível realizar o exercício de geração de conceitos realizando ao mesmo tempo as duas etapas seguintes: a definição conceptual da arquitetura inerente ao conceito (A, B e C) em causa (Figura 4.12), e a avaliação comparativa dos três conceitos (Tabela 4.12). É através de ambas que é possível obter uma vista geral do conceito resultante, além de uma melhor compreensão do significado do preenchimento das células da matriz. Propõe-se, portanto, uma conjugação das Etapas 5 e 10. No subcapítulo seguinte apresenta-se, então a proposta de Definição conceptual da arquitetura do CPS, onde se explica melhor esta conjugação de etapas, e se continua a Fase I de Desenvolvimento de conceitos de CPS.

#### **4.3.6. ETAPA 10 – DEFINIÇÃO CONCEPTUAL DA ARQUITETURA DE CPS**

Partindo da análise de aplicabilidade realizada no subcapítulo 3.3.10 e das suas conclusões positivas, propõe-se no presente subcapítulo uma definição conceptual da arquitetura do CPS, assente na lógica da Etapa 10 que Eppinger e Ulrich [77] elaboraram. Ou seja, como sugere a Figura 3.1, a Definição da arquitetura de produto genérico abrange as Fases I e II, pelo que, para realizar o design ao nível do sistema (II), é fundamental primeiro pensá-lo conceptualmente. É precisamente isso que este subcapítulo 4.3.6 expõe: uma proposta de definição conceptual da arquitetura do CPS, sem concretizar com o detalhe tecnológico, ao nível do sistema real, que já é necessário na Fase II. A arquitetura do CPS terá implicações profundas nas atividades subsequentes de CPSDD, e é por isso que a definição conceptual da mesma é de extrema importância. Só depois de esmiuçar a melhor solução de arquitetura, através de uma geração de conceitos de arquiteturas (conjugação da Etapa 5 com a Etapa 10) e da seleção metódica dos melhores conceitos de CPS já com uma arquitetura conceptual definida, é que se poderá chegar a um conceito completo e final que dê algumas garantias de que o projeto de CPSDD irá ser bem-sucedido.

Levando esta nuance introdutória em consideração, é então proposta a Etapa 10, que inclui os quatro passos ilustrados na Figura 4.11, que estão explicados em maior detalhe na página L do Anexo C. Ao contrário dos passos apresentados das etapas anteriores, esta sequência de passos não segue a sequência proposta em PDD [77].

## ETAPA 10 - DEFINIÇÃO CONCEPTUAL DA ARQUITETURA DE CPS



Figura 4.11 – Passos e principal *output* da Etapa 10.

Não obstante, muitas das lógicas conceptuais inerentes aos passos genéricos foram utilizadas, como por exemplo a “criação de um esquema” ou as “identificação de interações” [77].

Depois de reunir os diferentes recursos de CPS seleccionados e qualitativamente especificados, é elaborado um *layout* esquemático onde se organizam os recursos de acordo com as respectivas secções das implantações onde são necessários. Tendo em conta a organização das implantações (Figura 4.3), para a Empresa A faria sentido agrupar os recursos em sete blocos, como está ilustrado na Figura E – 1. Foi criado um bloco destinado à comunicação e registo de problemas nas restantes secções (e transportes entre secções) de toda a VC interna, assim como um bloco numa rede exterior às implantações. Os restantes blocos estão de acordo com as secções das implantações. Depois, seguir-se-ia a elaboração de uma tabela onde se reúne informação relativa aos níveis de satisfação alvo estabelecidos, para cada recurso, de cada secção das implantações da Empresa A, para cada conceito gerado. Na Tabela 4.11 é apresentado um exemplo de uma linha desse *output* intermédio.

Tabela 4.11 – Exemplo de compêndio de informação relativa ao Conceito A (E10 – P1).

SECÇÃO (S)	RECOLHA DE INFORMAÇÃO	REFERÊNCIAS	NECESSIDADES	N. SATISFAÇÃO	CONCEITOS
FIGURA 4.4, FIGURA E – 1			→ TABELA E – 1, TABELA E – 2	TABELA 4.9	TABELA 4.10
RECEÇÃO E LOJA	<p><b>2 – Disponibilização de info. de inventário de artigos p/ venda em armazém</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Todos os campos de dados essenciais e úteis para a operação em causa</li> <li>• Atualização automática e em tempo real</li> <li>• Todos os locais relacionados com a operação em causa</li> <li>• Estrutura complexa, com a coleção organizada de valores de dados essenciais e úteis, várias relações entre eles, e funções aplicadas automaticamente</li> <li>• Compatibilidade efetiva entre aplicativos, sistemas e tipos de dados; enriquecimento da informação através de combinações de fontes diversas; encriptação</li> </ul> <p><b>3 – Possibilitação do registo dos pedidos na loja</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Ferramentas de registo automático de dados, atualizando-os automaticamente para o IS, a partir de uma interface ergonómica, intuitiva e móvel</li> <li>• Todos os locais relacionados com a operação em causa.</li> </ul>				

Uma vez coligida toda a informação para cada secção das implantações, segue-se a realização conjunta dos dois passos seguintes. Por um lado, no Passo 2 listar-se-iam os componentes e funcionalidades necessários a fim de construir os níveis da Arquitetura de CPS para cada conceito gerado na Tabela 4.10. Este exercício deve ser guiado através da consulta simultânea dos tópicos chave do Modelo Conceptual Final dos 8C (Figura 2.6) e dos *outputs* das etapas anteriores. O resultado é uma

lista de instruções organizadas pelos respectivos níveis C. Na Tabela E – 4 é exposto um exemplo do que poderia ser o *output* deste exercício para o Conceito A. Por outro lado, no Passo 3, à medida que cada componente ou funcionalidade é listado, estes devem ser mapeados, seguindo as instruções em anexo. Depois da elaboração do último passo, o *output* da Etapa 10, para o Conceito A, poderia resultar na Arquitetura de CPS apresentada na Figura 4.12 (página 70). Note-se que as funcionalidades do nível de Cognição (IV) fazem todas as partes do conceito de MES do CPS, ou seja, o MES é o Conceito Tecnológico gerado que inclui funcionalidades de outros conceitos mencionados na literatura, como o WMS. Na Figura E – 2, está apresentado o que poderia ser a arquitetura conceptual do conceito mais simples (Conceito C). Não se incluiu a arquitetura do Conceito B por não acrescentar mais valor para a presente tese. Comparando as duas arquiteturas, que explicitam conceitos gerados na Etapa 5 (Tabela 4.10), salientam-se as diferenças claras nos graus de complexidade e funcionalidade. O Conceito C é mais bastante mais simples, e fornece essencialmente capacidades como a comunicação entre os colaboradores da Empresa A e os fornecedores, ou capacidades básicas de planeamento de operações, graças à recolha de informação dos pedidos feitos em loja, ao registo de entradas no armazém, e dos registos de problemas apenas no setor de corte. Requer, por isso, um MES bastante simples e capacidades de armazenamento e de tratamento de informação básicas. Já o Conceito A é bastante mais complexo e integral a toda a organização e VC, proporcionando à Empresa A capacidades de Cognição (IV) muito superiores, e alavancando capacidades dos níveis de Clientes (VIII), com a aplicação na internet para realização de encomendas, e de Coalizão (VI), com a capacidade de reação inteligente a alterações nos pedidos de encomendas. O Conceito A requer, portanto, um MES bastante mais complexo, que suporte uma maior variedade de ferramentas e funcionalidades, assim como capacidades bastante superiores de processamento, armazenamento, de servidores, etc. No subcapítulo seguinte (4.3.7) o leitor poderá encontrar os resultados e conclusões de uma análise comparativa matricial destes conceitos, e a posterior seleção de um deles.

#### **4.3.7. ETAPAS 6 E 7 – SELEÇÃO E TESTES DE CONCEITOS**

Na análise de aplicabilidade elaborada no subcapítulo 3.3.6, concluiu-se que as lógicas e ferramentas de avaliação, comparação, aprimoramento e seleção de conceitos (Etapa 6) de PDD [77], são bastante úteis para o design de CPS. Revendo os procedimentos da Etapa 10, ao elaborar a definição conceptual da arquitetura salientou-se ser muito importante a conjugação da lógica de aprimoramento, ao “podar” funcionalidades e componentes: primeiro no Conceito A e, depois, especialmente no Conceito C. Os diversos acertos e “podas” foram essenciais para chegar a conceitos realmente necessitados pelo BM da Empresa A, e cuja implementação inicial tem garantias de ser acessível. Agora, a avaliação comparativa dos três conceitos gerados na Tabela 4.10 poderia ser elaborada recorrendo a uma matriz como a que está apresentada na Tabela 4.12 (página 71). Cada um dos preenchimentos da matriz seria discutido entre toda a equipa de desenvolvimento, confirmando, mais uma vez, a real necessidade de cada funcionalidade ou componente. Novamente, os três conceitos gerados nas etapas anteriores são refinados em mais um exercício de geração e listagem de “fragmentos” de conceitos. De facto, foi exatamente isso que aconteceu: à medida que se foi populando a Tabela 4.12, foi-se refinando e melhorando os vários *outputs* anteriores, especialmente os esquemas das arquiteturas e até a matriz de geração de conceitos. Uma vez mapeados os Conceitos de CPS, quer esquematicamente (Figura 4.12) quer matricialmente (Tabela 4.12), e depois de ter sido avaliada cada parcela dos



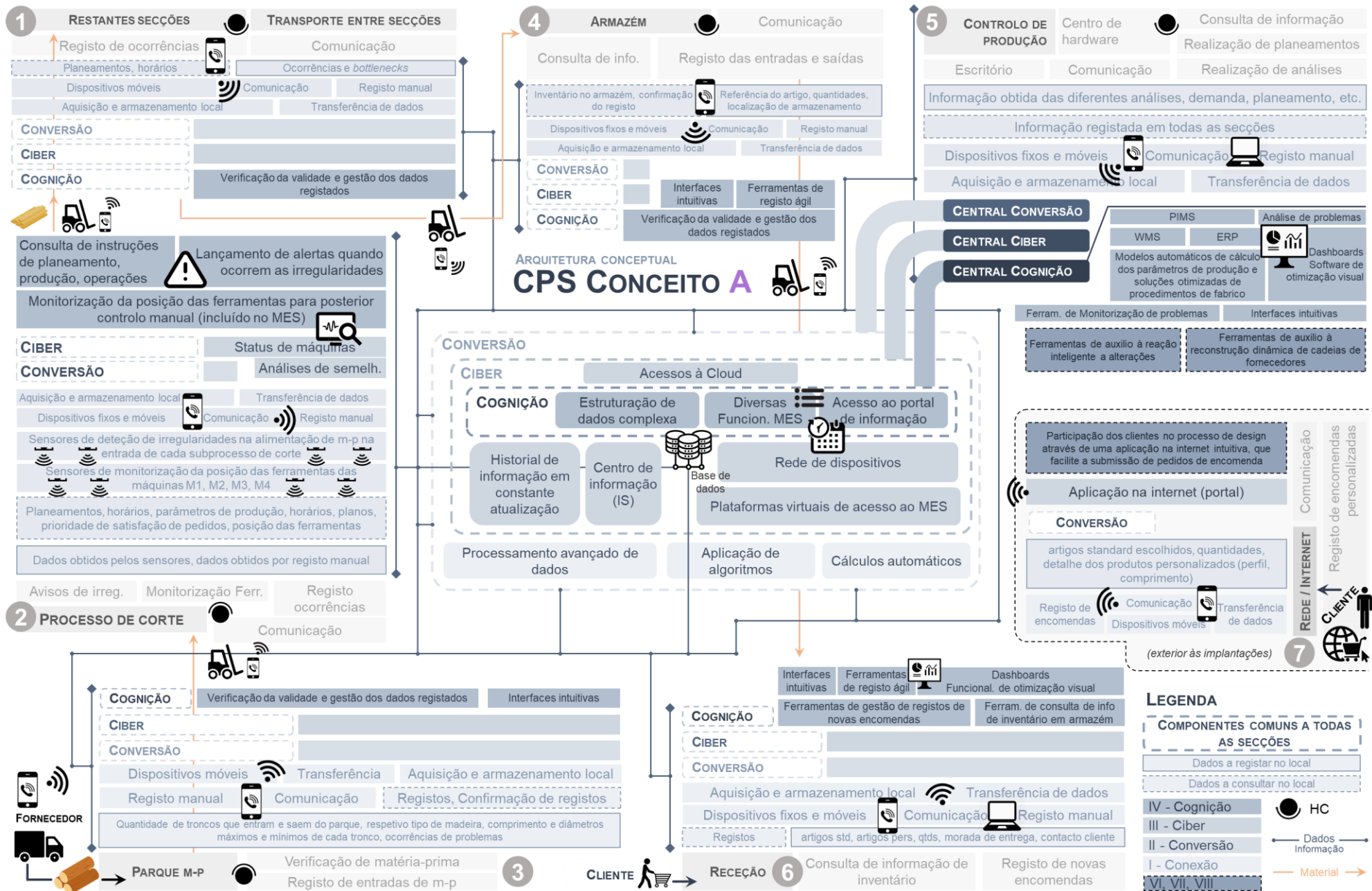


Figura 4.12 – Esquema para a arquitetura conceptual de CPS do Conceito A (E5 e E10).

Tabela 4.12 – Análise comparativa de conceitos (E7).

8 C	COMPONENTES E FUNCIONALIDADES	CONCEITOS DE CPS→ TABELA 4.10→	A	B	C
I CONEXÃO	Comunicação móvel básica (mensagens e voz)		✓	✓	✓
	Comunicação digital básica (e-mails, img, pdf, etc.)		✓	✓	✓
	Comunicação digital avançada (apps colaborativas)		✓	✗	✗
	Registo manual básico		✓	✓	✓
	Registo manual intuitivo com aplicação		✓	✓	✗
	Registo ágil e automático com dispositivos de leitura		✓	✗	✗
	Sensores simples de aquisição de dados		✓	✗	✗
	Sensores complexos de aquisição de dados		✗	✗	✗
	Dispositivos de registo e consulta básicos		✓	✓	✓
	Dispositivos de registo e consulta avançados		✓	✗	✗
	Aquisição e armazenamento local		✓	✗	✓
II CONVERSÃO	Transferência rápida de dados		✓	✓	✓
	Processamento de dados com algoritmos simples		✓	✓	✗
	Processamento de dados com algoritmos avançados		✓	✗	✗
III CIBER	Ferramentas básicas de PHM (conversão rápida)		✓	✓	✗
	Centro de informação simples		✓	✓	✓
	Centro de informação complexo		✓	✗	✗
	Historial de informação atualizado manualmente		✓	✓	✓
	Historial de informação atualizado automaticamente		✓	✗	✗
IV COGNIÇÃO	Rede de dispositivos		✓	✗	✗
	Estruturação simples de informação		✓	✓	✓
	Estruturação complexa de informação		✓	✓	✗
	Consulta de instruções de planeamento, produção, operações		✓	✓	✓
	Lançamento de alertas automáticos		✓	✓	✗
	Monitorização da posição de algumas ferramentas		✓	✗	✗
	Monitorização da posição de todas as ferramentas		✓	✗	✗
	Ferramentas complexas de Gestão de Info. de Produção (PIMS)		✓	✓	✗
	Ferramentas simples de Gestão de Info. de Produção (PIMS)		✓	✓	✓
	Ferramentas complexas de Gestão de Armazém (WMS)		✓	✗	✗
	Ferramentas simples de Gestão de Info. de Produção (PIMS)		✓	✓	✗
	Ferramentas complexas de Gestão de Info. de Produção (PIMS)		✓	✗	✗
	Ferramentas simples de análise inteligente aos problemas		✓	✓	✓
	Ferramentas complexas de análise inteligente aos problemas		✓	✗	✗
	Ferramentas de Planeamento de Recursos Empresariais (ERP)		✓	✗	✗
	Modelo simples de cálculo dos parâmetros de produção e soluções otimizadas de procedimentos de fabrico		✓	✓	✗
	Modelos complexos de cálculo dos parâmetros de produção e soluções otimizadas de procedimentos de fabrico		✓	✗	✗
	Verificação da validade e gestão dos dados registados		✓	✓	✗
	Otimização visual através de aplicativos com <i>dashboards</i>		✓	✗	✗
	Interfaces e aplicações intuitivas		✓	✗	✗
V CONFIGURAÇÃO	N/A		✗	✗	✗
VI COALIZÃO	Ferramentas de auxílio à reação inteligente a alterações		✓	✗	✗
	Ferramentas de reconstrução dinâmica de cadeias de fornecedores		✓	✗	✗
VII CONTEÚDO	Otimização dos parâmetros de produção		✓	✗	✗
	Funcionalidades de planeamento e ERP		✓	✗	✗
VIII CLIENTE	Participação dos clientes no processo de design através de uma aplicação intuitiva, que facilite a submissão de pedidos de encomenda		✓	✗	✗

✓ Incluído no CPS em todas as secções das implantações onde é necessário. ✗ Incluído no CPS em parte das secções das implantações, ou Incluído mas só parte das funcionalidades em causa. ✗ Não incluído no CPS.

CPS gerados, o passo seguinte consiste na seleção de um conceito final para testes e posterior implementação nas fases seguintes de CPSDD. Para melhor avaliação, comparação e seleção de conceitos, seria recomendável que a Empresa A pedisse à empresa especialista estimativas dos custos de instalação/desenvolvimento de cada conceito, numa lógica de orçamento macro, ainda sem muito detalhe, mas que ajudasse à compreensão das magnitudes de investimento. Por conseguinte, no projeto da Empresa A, poderia fazer sentido selecionar-se o Conceito mais simples (C) tendo em conta a incapacidade de capital financeiro e humano da empresa. Além disso, a decisão é tomada com a sensatez de saber que uma vez construída a primeira versão de CPS (implementação do Conceito C), se pode lenta

e iterativamente ir desenvolvendo e adicionando funcionalidades “soltas”, sempre que fundos estejam disponíveis e o investimento se justifique na dada altura do negócio.

Finalmente, seguem-se os testes ao conceito selecionado, que devem seguir a lógica de aplicabilidade apresentada no subcapítulo 3.3.7. Deve-se confirmar cada decisão singular, testando cada parcela de cada conceito. Deve-se averiguar ultimamente se os futuros utilizadores, da funcionalidade em causa, encontram uma necessidade real que, de facto, justifica o investimento. Responsáveis financeiros da Empresa A devem dar uma confirmação final relativa à estimativa de custos e investimento necessário. O objetivo dos testes é obter-se um leque de opiniões completo e objetivo, que permita adquirir uma garantia segura de que o modelo conceptual final tem realmente funcionalidades indispensáveis para o CPS, concluindo, assim, que é chave para melhor alavancar o BM.

#### **4.3.8. ETAPAS 11 E 12 – DESIGN DE PRODUTO E PROTOTIPAGEM**

No seguimento do que foi exposto e analisado no capítulo 3, há três vertentes de design de produto que devem ser consideradas já na fase de desenvolvimento de conceitos: design industrial (1), design para o ambiente (2) e design robusto (4). É de realçar que os métodos de cada vertente, assim como os respetivos *outputs*, devem também ser complementares às etapas anteriores. Para esse efeito, nas seguintes linhas referem-se alguns exemplos. (1) Logo quando se começa a escolher funcionalidades de CPS e a definir conceptualmente uma arquitetura de CPS, é fundamental considerar fatores ergonómicos, relacionados com as práticas da empresa. De facto, se o leitor observar bem os *outputs* do caso de estudo, quando se esmiuçaram aprofundadamente as necessidades da Empresa A, o que se fez foi registar informação útil também para projetar a ergonomia CPS, na perspetiva de maximizar as vantagens da utilização das funcionalidades e a experiência dos utilizadores (colaboradores da empresa). (2) Por outro lado, se não se colocar logo desde o início na equação a importância de redução de desperdícios e de impacto ambiental, é pouco provável que o CPS venha a corrigir práticas eco-ineficientes da empresa, o mais provável é que ainda maximize esse impacto negativo. (3) Por último, apesar de ser tipicamente desempenhado nas fases mais avançadas do CPSDD, a lógica do design robusto deve acompanhar já o desenvolvimento de conceitos, a fim de evitar conflitos entre conceitos e implementações, relativamente a problemas de qualidade e fiabilidade.

Quanto à etapa de prototipagem, a sua lógica e métodos devem estar também presentes na Fase I. De facto, a Definição conceptual da arquitetura de CPS envolveu a criação de um protótipo virtual, ainda que esquemático e sem grande aproximação à realidade física. Os ensaios de arquitetura poderiam ter sido elaborados recorrendo a *softwares* de simulação. Em suma, este subcapítulo foi criado para salientar que as lógicas destas duas Etapas 11 e 12, também se aplica ao desenvolvimento de conceitos, apesar de esta fase não ser onde ambas se concretizam e concluem, mas apenas se iniciam conceptualmente.

#### **4.3.9. ETAPA 9 – PLANEAMENTO DE PROJETO**

A Etapa 9 surge depois de um procedimento escrupuloso de identificação, geração e triagem. Esse procedimento (etapas anteriores) deve resultar num conceito de CPS suficientemente aprimorado, comparado, avaliado, selecionado (entre algumas alternativas) e testado finalmente. Tendo-se chegado a um conceito final, é o momento de planear as fases seguintes de CPSDD. Grande parte dos diferentes documentos resultantes de cada etapa consistem em instruções organizadas em listas, mapeamentos e esquemas. São estes sistemas de informação (ver nota de rodapé da página D) que

expõem e resumem as diferentes parcelas de CPS a desenvolver nas Fases de CPSDD pós-conceptuais (subcapítulo 4.4). É na presente etapa que se reúnem todos esses documentos dos diferentes subprojetos e se planeia o primeiro projeto de implementação, onde esses subprojetos são calendariados e planejados. Devido à complexidade que o projeto pode ter, mesmo tendo sido selecionado o conceito mais simples, esse lançamento exige um planejamento, que quanto mais perscrutado for, mais célere o projeto será. Para este efeito, é recomendável utilizar muitas das metodologias do planejamento de projeto de PDD [77], referidas no subcapítulo 3.3.9. Mencionando apenas alguns exemplos, dever-se-ia mapear as diferentes tarefas de cada subprojeto em gráficos PERT, analisando as dependências e ajustando as durações de projeto aos objetivos estabelecidos na Etapa 2 (Figura 4.7). Seria também essencial a elaboração do Livro de Contratos, onde constariam todos os documentos fundamentais, como a estimativa de orçamento do projeto e a lista de competências e alocações.

#### 4.4. DO CONCEITO À IMPLEMENTAÇÃO (SUBPROJETOS)

O resultado do design e desenvolvimento conceptual de CPS deve ser um conceito de CPS consistente e um planejamento detalhado para os desenvolvimentos pós-conceptuais (de implementação real) a jusante. No seguimento da introdução no subcapítulo 4.1, o objetivo do presente subcapítulo 4.4 é analisar de que forma uma metodologia proposta na literatura se integra nas fases de implementação real do CPSDD e de que modo é que as complementa. Realizou-se esta proposta de integração porque ambas as vertentes de desenvolvimento, quer a de PDD [77] quer a do conjunto de literatura revista sobre design de CPS, oferecem métodos que se podem complementar de forma útil para o CPSDD. Esta concretização real já requer conhecimentos mais tecnológicos e específicos, no âmbito da engenharia de sistemas, informática e eletrónica, existindo já vários modelos e abordagens que cobrem esta parte do desenvolvimento de CPS de forma extensiva e coerente. Após as análises conclusivas dos subcapítulos 2.3.2 e 2.4, escolheu-se a metodologia de Design de CPS Baseado em Modelos (MBD) [64] para as fases avançadas da metodologia proposta no capítulo 4. Esta escolha justifica-se no facto de este ser, dos métodos que foram estudados, o mais completo e que engloba a generalidade dos passos e lógicas dos restantes. Ainda assim, a aplicação exclusiva das 10 atividades de MBD [64] não garante que o recurso de CPS desenvolvido e construído seja a melhor solução para a organização, aquela que satisfaria soluções reais, ou com garantias de que os investimentos não seriam realizados em vão. É por isso que se propõe a integração da metodologia de MBD [64] na metodologia de PDD [77].

Assim, neste subcapítulo é proposta a integração das atividades<sup>15</sup> (A#) do MBD [64] nas fases de CPSDD (adaptadas de PDD [77]), fazendo referência às etapas (E#, ver Figura 3.1), cujas análises de aplicabilidade já foram realizadas no capítulo 3. As instruções relativas a cada A# foram divididas em subatividades A#.§, cujos títulos estão nas caixas retangulares cinzentas da Figura 4.13, e todo o respetivo detalhe oferecido por Jensen *et al.* [64] encontra-se na Tabela A – 1. Nesta figura apresenta-se um esquema simplificado da complementação do MBD com etapas do PDD, juntamente com a correspondência das fases, introduzindo assim a referida integração apresentada em maior detalhe nos parágrafos subsequentes.

---

<sup>15</sup> Apesar de Jensen *et al.* [64] terem publicado uma sequência de passos, nesta dissertação utilizou-se o termo “Atividade” para facilitar a análise comparativa entre metodologias.

# CPSDD: DO CONCEITO À IMPLEMENTAÇÃO

FASES E ETAPAS PARA CADA SUBPROJETO

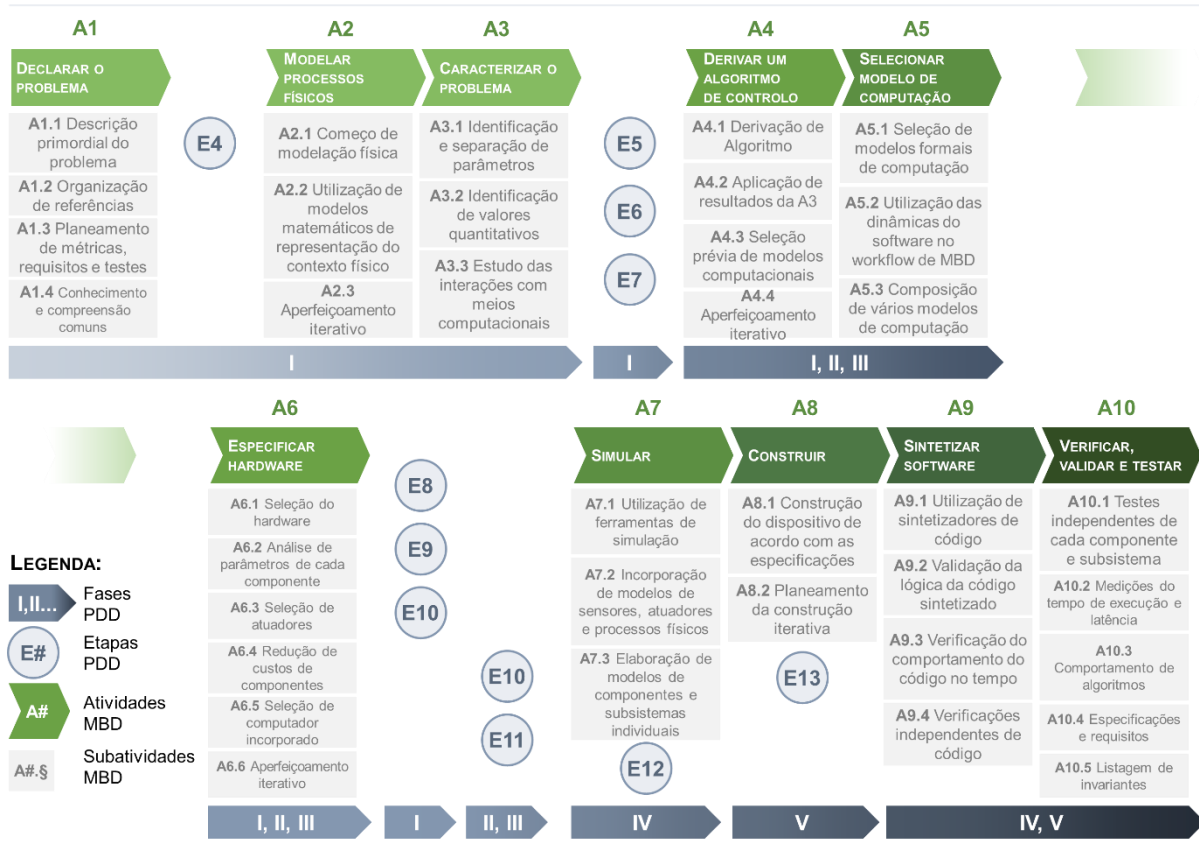


Figura 4.13 – Complementação do MBD com etapas do PDD e correspondência das fases.

Do mesmo modo que faz sentido aplicar a lógica de desenvolvimento conceptual para o CPS macro, também pode ser muito útil aplicá-la a um nível dos blocos de componentes, dos subsistemas, dos próprios recursos elementares de CPS, isto é, a um nível micro. Isto porque no projeto macro apenas se definiu um conceito com diretivas qualitativas para cada recurso, e agora é necessário desenvolver conceitos tecnologicamente mais concretos e específicos. É lógico que desempenhar as diferentes etapas de PDD [77] pode ser muito útil para que se chegue à melhor solução possível para cada recurso, cada componente, cada assemblagem, etc. É por isso que foi criado este subcapítulo 4.4, onde se apresenta a integração do MBD [64] nas fases avançadas de PDD [77].

Assim, propõem-se que cada subprojeto “do conceito à implementação” inclua uma adaptação às cinco últimas fases de PDD [77]: desenvolvimento de conceitos (I), design ao nível do sistema (II), design ao nível do detalhe (III), testes e refinamento (IV), e *ramp-up* de produção (V). Ou seja, propõe-se uma adaptação dos métodos e lógicas genéricas ao CPS e simultaneamente uma complementação com *inputs* do MBD. Os nomes das fases aplicam-se diretamente, exceto a Fase V que fica “*ramp-up* de implementação e utilização”.

Em cada subprojeto “do conceito à implementação”, a fase I trata-se de desenvolvimento de subconceitos ou conceitos micro, uma vez que os conceitos de CPS macro já foram gerados no (pré) projeto de design conceptual. A fase de planeamento (0) não foi incluída por também já ter sido desempenhada e não se encontrar utilidade em repetir os seus passos. É pela mesma razão que na fase I se propõe o começo já na Etapa 4 “elaboração de especificações alvo”. Isto é, analisou-se se faria sentido começar logo na Fase II, mas chegou-se à conclusão de que as etapas finais da Fase I podem ser

muito úteis para se chegar às melhores soluções, e por isso foram também incluídas na proposta. Ou seja, apesar de no projeto conceptual já se ter desenvolvido e se ter chegado a um conceito de CPS, agora é o momento de o executar e implementar. Para que essa execução seja o mais eficiente possível, pode ser muito útil desempenhar novamente as etapas de geração, seleção e teste de conceitos específicos, ao nível do subsistema, onde já se consideram tecnologias e modelos de marcas específicos. Agora já não se geram conceitos subjetivos mas sim objetivos, quantitativos e tecnologicamente específicos. Quanto melhor se esmiuçar as alternativas de resolução do problema, melhor será a solução e, por conseguinte, a sua execução e implementação reais. Isto porque serão cometidos menos erros nas escolhas. De facto, a metodologia de “Design de CPS baseado em modelos” [64] é, como o próprio nome indica, uma metodologia de design, concentrada fundamentalmente no design técnico e tecnológico. Ou seja, não tem nenhuma atividade ou conjunto de atividades destinada ao desenvolvimento de conceitos. Por exemplo, a lógica de gerar vários conceitos não é algo explicitamente recomendado pelo MBD. Logo, é de esperar que o MBD se concentre especialmente nas Fases II, III, IV e V. Apesar disto, é realizada uma análise de integração do MBD na Fase I, por se considerar útil aplicar a lógica de gerar várias soluções para depois se seleccionar a melhor, em vez de se gerar apenas uma, algo que acontece se a lógica de desenvolvimento de produto não for aplicada.

Para melhor conseguir explicar esta proposta, elaborou-se um exemplo baseado no que poderia ser um dos primeiros subprojetos de implementação do conceito de CPS selecionado pela Empresa A. Considere-se, então, que agora seria o momento certo para a Empresa A implementar o recurso de CPS “Monitorização de algumas ferramentas” (ver Tabela 4.12).

A Fase I de um projeto de implementação real inicia-se consultando os documentos resultantes do planeamento (Etapa 9 do design e desenvolvimento conceptual), e seleccionando uma parcela do conceito final para iniciar o primeiro projeto de implementação. Deve-se também reunir e rever toda a informação que sustenta as necessidades do recurso selecionado, a fim de compreender, com algum detalhe, os seus princípios de funcionamento e em que contexto este irá operar. Depois de se rever toda a informação, a equipa de desenvolvimento deveria declarar inicialmente o problema, sucintamente, e de imediato iniciar um estudo de todos os detalhes do desafio que tem em mãos (A1 – Declarar o problema). O planeamento de projeto (A1.3) pode ser entendido como uma revisão da E9 do projeto conceptual (subcapítulo 4.3.9). Porém é nesta atividade que se identificam as métricas, que dizem respeito à E4 (elaboração de especificações alvo). É também na A1.3 que os requisitos de CPS mencionados na Figura 2.6 e Tabela 2.12 devem ser estabelecidos. As subatividades de organização de referências (A1.2) e de confirmação do conhecimento e compreensão comum (A1.4) são também úteis para o *kick-off* de um projeto de implementação.

Tal como ficou analisado no subcapítulo 3.3.5, a teoria de PDD [77] sugere que a E5 (que agora muda o nome para geração de subconceitos) se inicie com a clarificação do problema, que consiste na decomposição do mesmo em subproblemas consoante as funções do produto, ou as ações do utilizador, e geralmente desenham-se diagramas de funções. Averiguando onde é que estas decomposições se enquadram no MBD [64], conclui-se que é nas atividades A1, A2 e A3, que têm como objetivo a clarificação, decomposição, modelação e caracterização detalhada do problema. Apesar de no projeto conceptual já se ter iniciado estas tarefas de desenvolvimento, agora é importante organizar todas essas informações e aprofundar ao detalhe o estudo do problema. Para a Empresa A faria sentido

começar-se por escolher uma estação de trabalho. Por exemplo, para o projeto da retestadeira M3, que é constituída por um sistema hidráulico que segura as peças para a obtenção de um corte com precisão, seria necessário registar todos os detalhes do sistema hidráulico para modelar o contexto físico (A2.1), caso fosse útil, recorrer-se-ia à elaboração de modelos matemáticos (A2.3). Depois de se obter um modelo completo do processo do sistema hidráulico, o passo seguinte é saber que dados se têm de obter. Para isso, primeiro é necessário identificar e separar os diferentes parâmetros que caracterizam o processo físico (A3.1), para depois averiguar quais as quantidades para esses parâmetros, como espaços de configuração, *inputs* e *outputs* (A3.2).

O último passo antes do começo da geração de subconceitos propriamente dita é o estudo das interações da recolha de dados com os meios computacionais (A3.3). Estando mapeado todo o problema e especificados os requisitos, a derivação de um algoritmo (A4), a seleção de um modelo computacional (A5) e a especificação de hardware (A6) são atividades que incluem gerações de subconceitos (E5). Tal como sugerem Eppinger e Ulrich [77], o MBD [64] também requer trabalho de pesquisa externa e pesquisa interna. A determinação das condições dos processos físicos e derivação de um algoritmo de controlo adequado (A4.1) é uma subatividade inicial e essencial de design e desenvolvimento interno. Jensen *et al.* [64] declaram mesmo que pode ser melhor estudar e selecionar modelos de computação previamente (A4.3), porque pode ajudar à própria derivação do algoritmo.

Apesar da ordem das atividades A2, A3, A4, A5 e A6 ser lógica, os autores fazem uma recomendação especial de aperfeiçoamento iterativo entre as mesmas (A4.4 e A6.6), algo que também é encarecidamente aconselhado na Fase I de PDD [77]. A geração de vários subconceitos específicos, e não só um ou dois, é algo que é de certo modo sugerido no MBD [64] nas subatividades A4.3 e A5.3, de seleção e composição de vários modelos computacionais. Porém, a geração de subconceitos para todo o recurso em causa não é algo que seja recomendado no MBD [64]. Isto é, apesar de se sugerir a seleção de *software* e *hardware*, não se recomenda a elaboração e o aprimoramento de conceitos, exercícios que na seleção de conceitos (E6) de PDD [77] são feitos através de tabelas de combinação de fragmentos de conceitos e matrizes de seleção. Com estas ferramentas, poder-se-ia facilmente averiguar quais as melhores soluções de modelos computacionais e *softwares* disponíveis, assim como que *hardware* (sensores, atuadores, servidores, interfaces, etc.), seriam adequados tendo em conta os requisitos funcionais e de investimento.

A redução de custos de componentes (A6.4) é recomendada no MBD [64], e não há dúvida que os estudos económicos são essenciais para otimizar custos. Porém os métodos e passos que o PDD [77] oferece podem ser muito úteis, pelo que devem ser adaptados e incluídos na geração de conceitos do projeto de implementação. Para a Empresa A, provavelmente seria importante investir num sensor com garantias de precisão para assegurar a precisão do corte, e quanto mais se procurar alternativas de sensores disponíveis no mercado, mais adequado será o sensor comprado.

Quanto aos testes de conceitos (E7), não são referidos no MBD [64], mas podem também ser úteis. Para a Empresa A, após se ter chegado a alguns conceitos, poderia ser muito relevante pedir *feedback* aos colaboradores e operadores do processo de corte que irão usar recurso que está a ser projetado, pedindo-lhes aprovação dos modelos selecionados, das funcionalidades que irão ser criadas e de que modo o *software* selecionado irá solucionar o problema.

Quanto à definição de especificações finais (E8), não há nenhuma atividade inteiramente desti-

nada para o propósito, apesar de se utilizar o termo “especificar *hardware*” no título da **A6**, e da necessidade de se “construir o dispositivo de acordo com as especificações” (**A8.1**). Na verdade, no MBD [64] não se incluiu nenhuma fase de desenvolvimento de conceitos, logo não se incluíram todas as etapas de PDD onde se inserem duas etapas relativas a especificações. No entanto, se o leitor revir a atividade **A1.3**, poderá concluir que a definição de especificações finais para o design nas fases posteriores faz parte do planeamento de projeto de MBD [64]. Nessa atividade **A1.3**, é importante incluir as diferentes ferramentas e métodos para definir especificações finais, que foram identificadas no subcapítulo 3.3.8.

Fechando a proposta de integração do MBD [64] no desenvolvimento de subconceitos específicos, conclui-se que o MBD [64] oferece ações de desenvolvimento que são característicos de PDD [77], o que indica que parte do raciocínio e lógica de Jensen *et al.* [64] está alinhado com a lógica de PDD [77]. Ao integrar as diferentes subatividades do MBD nas etapas de PDD, complementa-se o MBD com boas práticas de desenvolvimento de produto, promovendo um desenvolvimento mais completo e detalhado.

As atividades propostas no MBD [64] abordam o design de componentes de *software* (**A4**, **A5**) e componentes de *hardware* (**A6**). A proposta que é feita nesta dissertação é integrar estas atividades primeiro no design ao nível do sistema (II), e segundo no design ao nível do detalhe (III). Relativamente ao caso de estudo, se estivesse em causa o primeiro projeto de implementação de CPS de sempre na Empresa A, e visto que esta não possui ainda nenhum bloco central de tecnologias de informação ou *hardware*, seria importante começar por esse bloco. Isto porque esses componentes seriam ativos comuns e necessários a todos os recursos de CPS que viriam a ser desenvolvidos seguidamente. Nessa situação inicial de implementação, dever-se-ia selecionar um conjunto de recursos de CPS para fazer o design ao nível do sistema (II). Primeiro considerar-se-ia o sistema como o conjunto de todos esses recursos, e definir-se-ia a arquitetura do bloco central de componentes e das interfaces com os blocos locais em cada secção da Empresa A. Esse design da arquitetura ao nível do sistema requereria já concretização real técnica e tecnológica, ajustada às implantações e atividades da Empresa A.

Nesse sentido, deve ser minuciosamente projetado cada bloco de componentes de cada nível (8C) identificado no projeto conceptual. É importante seguir os passos e recomendações da definição da arquitetura de CPS (**E10**) que Eppinger e Ulrich [77] sugerem, como por exemplo a definição da modularidade do CPS (tópico que é importante na atividade de simulação **A7.2**). A utilidade deste e outros tópicos já foi analisada no capítulo 3, e agora é o momento de os colocar em prática. A **E10** referida acima e o design de CPS (**E11**, ver subcapítulo 3.3.11) devem ser realizadas em consonância e através das quais realizar-se-iam as atividades **A4**, **A5** e **A6**. Mencionando alguns exemplos, no design para implementação (3.3.11.3) as listas de componentes e os modelos de custo são importantes para a aquisição de componentes ou dispositivos para o CPS, e é aqui que entram as subatividades de especificação de *hardware* **A6.1**, **A6.2**, **A6.3**, **A6.4** e **A6.5** (entre outras). Na verdade, faz sentido escrever que com estas seleções entra-se já numa fase de design ao nível do detalhe. É importante relembrar que estas seleções concretas só se devem fazer depois do design dos sistemas geral e local em causa serem elaborados, e de ter sido feito o design preliminar dos componentes específicos. Aliás, estas seleções fazem parte do design detalhado (Fase III), e requerem um método minucioso de análise e design de parâmetros de cada componente (**A6.2**).



A atividade de simulação (A7) remete diretamente para a prototipagem (E12) e pode ser integrada nas fases de design (II e III) e de testes e refinamento (IV). Com esta atividade, Jensen *et al.* [64] realçam a importância da utilização de ferramentas de simulação virtuais (A7.1), assim como a incorporação de modelos virtuais de sensores, atuadores e processos físicos (A7.2), ou até de modelos de componentes e subsistemas individuais (A7.3), subsistemas esses que são os blocos de componentes e níveis 8C da arquitetura definida e projetada.

No MBD, a construção (A8) é a antepenúltima das 10 atividades sequenciais, e remete para a fase V de CPSDD, de *ramp-up* de construção e implementação reais. Depois da A8, o MBD [64] inclui a sintetização do *software* (A9) e as verificações, validações e testes (A10). Apesar desta ordem diferir claramente da ordem das fases de CPSDD, onde a construção (fase V) vem depois dos testes (fase IV), as lógicas inerentes às duas abordagens são semelhantes. De facto, ambos recomendam veementemente que todo o procedimento seja intrinsecamente iterativo em matérias de construção e implementação real de recursos de CPS. Citando o que está escrito no subcapítulo 3.2.6, à medida que se for montando os diferentes blocos e subsistemas, devem ser realizados testes de qualidade, pelo que a Fase IV (testes e refinamento) deve ser iterada muitas vezes. Esta lógica de os autores do PDD [77] terem colocado os testes antes do *ramp-up* da produção reside no facto de que, para um produto genérico, geralmente é mais fácil construir protótipos físicos para testes reais, testes esses que são cruciais, por exemplo, para reduzir o risco do investimento nos meios de produção. A realidade do CPS é, regra geral, a de um “produto” complexo, e provavelmente terá sido por isso que Jensen *et al.* [64] não terão considerado a construção de protótipos físicos, como algo que não será utilizado na implementação e utilização reais do CPS. Mesmo assim, na presente proposta de metodologia, defende-se que a ordem de fases deva ser a mesma que PDD [77], porque é na fase IV que vêm os testes virtuais (simulações - A7). Adicionalmente, recomenda-se que pelo menos se averigüe se faria sentido em aspetos simples, particulares, ou até críticos, serem montados alguns protótipos físicos, ou partes destes (análise do subcapítulo 3.2.6). Assim, nos testes e refinamento de CPSDD pós construção, implementação e começo de utilização reais, devem-se integrar as diferentes subatividades sugeridas no MBD [64], relativas à A9 e A10.

Por último, para alcançar o sucesso na execução do projeto de implementação e construção reais pode ser muito útil, ou mesmo crucial, aplicar as ações de gestão de projeto de coordenação, avaliação e correção (E13, Tabela B – 1). Porém, tal como ficou escrito no subcapítulo 3.3.9, o plano de projeto (E9) é uma entidade dinâmica que evolui ao longo do processo de desenvolvimento, pelo que deve ser atualizado à medida que o projeto é executado. Novamente, o MBD não inclui nenhuma atividade relacionada com gestão de projeto, pelo que a conjugação com o PDD [77] deve ser especialmente levada a cabo nesta matéria.

No capítulo 3 tinha-se chegado à conclusão de que o PDD [77] é veementemente aplicável ao design de CPS. Terminada esta análise de integração do MBD [64] nas fases avançadas do CPSDD “do conceito à implementação”, que por sua vez são baseadas e adaptadas do PDD [77], agora pode-se também concluir que os vários passos, métodos, exercícios, ferramentas, recomendações e lógicas de PDD [77] são, mediante adaptações diretas e indiretas, também aplicáveis às fases avançadas do projeto de CPSDD. Além de serem aplicáveis, demonstram poder ser de úteis para garantir que o projeto de CPSDD é holístico, célere e centrado no BM da organização.

## 4.5. ANÁLISE GERAL

Ao longo dos subcapítulos anteriores foram escritas algumas conclusões que antevêm esta análise final ao capítulo 4. Ao rever os *outputs* finais da proposta de metodologia para o projeto de design conceptual de CPS, ficam visíveis várias alternativas de recursos de CPS que podem formar conceitos de CPS macro entre os quais a empresa pode escolher, podendo optar por um CPS mais completo ou mais simples. Para se chegar a esse conceito de CPS final, propôs-se desempenhar várias etapas que podem dar algumas garantias que os recursos selecionados são realmente necessários e ajustados à realidade da empresa. Este foi o objetivo principal da presente tese, propor uma metodologia que ajude a planejar conceptual e estrategicamente o CPS antes de se tomar decisões concretas para a sua construção e implementação reais. Se uma empresa não realizar previamente este projeto conceptual, provavelmente iria investir na aquisição de tecnologias sem haver identificação clara da sua necessidade, o que poderia originar ineficiências muito prejudiciais para o negócio. Tendo uma equipa de desenvolvimento chegado a um conceito organizado de CPS macro e a um planeamento detalhado de como o implementar, propôs-se uma abordagem a ser desempenhada em cada subprojeto de implementação. Fica assim exposta uma abordagem assentada na adaptação ao CPS dos diferentes métodos de PDD [77], e da integração das metodologias patentes na literatura como o MBD [64]. Está explanado como é que a complementaridade entre metodologias poderá ajudar a uma melhor implementação real do conceito de CPS selecionado. Completa-se, assim, a proposta de uma nova abordagem de design de CPS.

## 5. CONCLUSÃO E FUTUROS PASSOS

A presente dissertação consiste numa primeira proposta de uma metodologia que integra a teoria de design e desenvolvimento de produto no processo de design e desenvolvimento de CPS.

No capítulo 2 são apresentados os resultados de uma revisão de literatura que tem como objetivo principal compreender o que é, como funciona, como é constituído um CPS e que abordagens existem publicadas e intituladas de design de CPS. Foi possível chegar a várias conclusões que estão apresentadas no subcapítulo 2.4, entre as quais de que não foi encontrada na literatura comum nenhuma metodologia que concirna devidamente a realidade particular de uma empresa, que a ajude a compreender a natureza do seu negócio e a sua forma de interação com o mercado, a fim de identificar oportunidades onde a utilização de recursos de CPS pudesse melhorar a performance da empresa. No entanto, existem várias abordagens de design de CPS que se destinam especialmente às fases avançadas de CPS. Nessas fases já se deve saber as diretrizes gerais do CPS a construir, chegando o momento certo para a implementação e construção reais dos recursos de CPS. Ou seja, a metodologia desenvolvida contribui para colmatar esta lacuna identificada na literatura, originando o objetivo principal da dissertação: propor um novo conjunto de fases, etapas, métodos e desenvolvimentos que o design de CPS requer. Esta metodologia deve ajudar a empresa desenvolvedora primeiro a projetar conceptualmente um CPS que parte do estudo do BM e das interações com o mercado, e que está totalmente focado em satisfazer as necessidades de produção e operações da empresa.

No capítulo 3, chegou-se à conclusão de que a grande maioria dos métodos e ferramentas propostas por Eppinger e Ulrich [77] são adaptáveis ao design e desenvolvimento de CPS. Concluiu-se

também que não só cada etapa é aplicável como a lógica da sequência, iteratividade e acoplagem das diferentes fases e etapas é aplicável. Estas conclusões mantêm-se mesmo depois do desfecho da elaboração da proposta de metodologia no capítulo subsequente.

No capítulo 4, é visível como é que a lógica de PDD [77] se aplica do princípio ao fim de um projeto de CPSDD, desde o “embrião de inovação” até ao começo de utilização real. No entanto, propõe-se esta nova estrutura de projeto dividida em duas grandes partes. Depois de se planear conceptualmente o CPS, que é um sistema de sistemas, formado por vários blocos, propõe-se que se elabore um subprojeto de implementação para cada um desses recursos. No projeto de design conceptual de CPS (macro) apenas se definiu um conceito com diretivas qualitativas para cada recurso e, portanto, é depois necessário desenvolver conceitos tecnologicamente mais concretos e específicos (ver explicação mais detalhada no subcapítulo 4.4). Como ficou escrito, o âmbito principal da presente tese foca-se na primeira parte, mas não se deixa de incluir uma introdução à segunda. Apesar de se ter dividido o projeto geral de CPSDD nestas duas partes, conclui-se que a sequência de fases de PDD [77] continua a fazer sentido, corroborando a segunda conclusão do capítulo 3 referida no parágrafo anterior. Adicionalmente, através da explanação da proposta de metodologia, pode-se concluir que são muitas as diferentes propostas feitas por Eppinger e Ulrich que se aplicariam a um projeto real de CPSDD. No entanto, o desempenhar de todas estas fases e passos requerem disponibilidade da empresa e capacidade de recursos humanos para desenvolver todo este longo planeamento conceptual proposto, algo que muitas vezes não abunda nas empresas. A principal razão que defende esta longa proposta é o facto de o CPS ser por definição um sistema muito complexo, por ser um sistema composto por muitos sistemas com vários níveis de implementação (8C), vários componentes (HC, CC, PC) e suas interfaces, vários requisitos, e várias funcionalidades. Para abordar um sistema desta complexidade, é crucial elaborar um desenvolvimento conceptual minucioso e metódico para entender que requisitos e recursos específicos é que são negocialmente imprescindíveis. Ou seja, conclui-se também que para dar este salto holístico de uma fábrica tradicional para uma fábrica mais inteligente (“*smarter factory*”) é necessário um projeto de inovação de grande magnitude e que envolva muito pessoal da empresa. Assim, uma das conclusões principais é que a utilização de uma estratégia sistemática de desenvolvimento de produto aplicado ao CPS, embora complexa potencia a identificação detalhada das funcionalidades necessárias, resultando num CPS mais ajustado.

Finalmente, seguindo a linha destas conclusões e outras apresentadas em cada capítulo, pode-se agora naturalmente afirmar que projetar o design e desenvolver um CPS seguindo minuciosamente a lógica de design e desenvolvimento de produto, pode potenciar uma maior adequação do CPS à realidade da empresa, ao seu negócio e às suas necessidades reais. Explanou-se uma abordagem que permite maximizar os benefícios do papel do CPS na melhoria da performance de uma empresa, o que não significa que se deva desenvolver o melhor CPS possível. Tendo em conta que se está perante uma introdução a esta nova abordagem, esta dissertação depende de trabalhos futuros de continuação do aprofundamento e formulação da “colaboração” entre o PDD [77] e as metodologias tecnocientíficas e de engenharia de CPS que a literatura poderá oferecer. Poderão ser realizados trabalhos que realizem estudos mais específicos e formulem aplicações mais concretas em cada etapa, aprofundando as diversas disciplinas científicas e as diferentes áreas de engenharia que um CPS engloba, por ser um sistema de sistemas bastante complexo e adaptável aos diferentes setores da indústria.

## REFERÊNCIAS

- [1] X. Yao, J. Zhou, Y. Lin, Y. Li, H. Yu, and Y. Liu, "Smart manufacturing based on cyber-physical systems and beyond," *J. Intell. Manuf.*, vol. 30, no. 8, pp. 2805–2817, 2019.
- [2] N. Jazdi, "Cyber physical systems in the context of Industry 4.0," *Proc. 2014 IEEE Int. Conf. Autom. Qual. Testing, Robot. AQTR 2014*, pp. 2–4, 2014.
- [3] A. R. Al-Ali, R. Gupta, and A. Al Nabulsi, "Cyber physical systems role in manufacturing technologies," *AIP Conf. Proc.*, vol. 1957, no. April 2018, 2018.
- [4] Y. B. Reddy, "Cloud-based cyber physical systems: Design challenges and security needs," *Proc. - 2014 10th Int. Conf. Mob. Ad-Hoc Sens. Networks, MSN 2014*, no. October 2015, pp. 315–322, 2014.
- [5] Networking and Information Technology Research and Development, "CPS Vision Statement," 2015.
- [6] T. Sanislav and L. Miclea, "Cyber-physical systems - Concept, challenges and research areas," *Control Eng. Appl. Informatics*, vol. 14, no. 2, pp. 28–33, 2012.
- [7] R. Rajkumar, I. Lee, L. Sha, and J. Stankovic, "Cyber-physical systems: The next computing revolution," *Proc. - Des. Autom. Conf.*, pp. 731–736, 2010.
- [8] V. Alcácer and V. Cruz-Machado, "Scanning the Industry 4.0: A Literature Review on Technologies for Manufacturing Systems," *Eng. Sci. Technol. an Int. J.*, vol. 22, no. 3, pp. 899–919, 2019.
- [9] J. Qin, Y. Liu, and R. Grosvenor, "A Categorical Framework of Manufacturing for Industry 4.0 and beyond," *Procedia CIRP*, vol. 52, pp. 173–178, 2016.
- [10] H. Lasi, P. Fettke, H. G. Kemper, T. Feld, and M. Hoffmann, "Industry 4.0," *Bus. Inf. Syst. Eng.*, vol. 6, no. 4, pp. 239–242, 2014.
- [11] S. Erol, A. Schumacher, and W. Sihn, "Strategic guidance towards Industry 4.0 – a three-stage process model," *Coma*, no. January, pp. 495–501, 2016.
- [12] Y. Yin, K. E. Stecke, and D. Li, "The evolution of production systems from Industry 2.0 through Industry 4.0," *Int. J. Prod. Res.*, vol. 56, no. 1–2, pp. 848–861, 2018.
- [13] A. Amaral, "A Framework for assessing manufacturing SMEs Industry 4.0 maturity," 2019.
- [14] Bitkom, VDMA, and ZVEI, *Implementation Strategy Industrie 4.0*, no. January. 2015.
- [15] R. Lichtblau, Karl; Stich, Volker; Bertenrath, "Industrie 4.0 Readiness," 2015.
- [16] H. Kagermann, W. Wahlster, and J. Helbig, "Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0," *Final Rep. Ind. 4.0 Work. Gr.*, no. April, pp. 1–84, 2013.
- [17] D. Ibarra, J. Ganzarain, and J. I. Igartua, "Business model innovation through Industry 4.0: A review," *Procedia Manuf.*, vol. 22, pp. 4–10, 2018.
- [18] M. Hermann, T. Pentek, B. Otto, and T. \* Pentek, "Design Principles for Industrie 4.0 Scenarios: A Literature Review," *49th Hawaii Int. Conf. Syst. Sci.*, no. January 2015, p. 16, 2015.
- [19] J. Davis *et al.*, "Smart Manufacturing," *Annu. Rev. Chem. Biomol. Eng.*, vol. 6, pp. 141–160, 2015.
- [20] P. Zheng *et al.*, "Smart manufacturing systems for Industry 4.0: Conceptual framework, scenarios, and future perspectives," *Front. Mech. Eng.*, vol. 13, no. 2, pp. 137–150, 2018.
- [21] A. Ahmadi *et al.*, "Evolution of 3C - Cyber-Physical Systems Architecture for Industry 4.0," *8th*

- Work. Serv. Orientat. Holonic Multi-Agent Manuf. (SOHOMA 2018)*, no. May, 2018.
- [22] D. Gorecky, M. Schmitt, M. Loskyll, and D. Zühlke, "Human-Computer-Interaction in the Industry 4.0 Era," pp. 289–294, 2014.
- [23] A. Reiner, "Industrie 4.0 - Advanced Engineering of Smart Products and Smart Production," *Int. Semin. High Technol.*, no. October, pp. 1–14, 2014.
- [24] D. Weihrauch, P. A. Schindler, and W. Sihn, "A Conceptual Model for Developing a Smart Process Control System," *Procedia CIRP*, vol. 67, pp. 386–391, 2018.
- [25] C. Santos, A. Mehrsai, A. C. Barros, M. Araújo, and E. Ares, "Towards Industry 4.0 : an overview of European strategic roadmaps," *Procedia Manuf.*, vol. 13, pp. 972–979, 2017.
- [26] S. V. Buer, J. O. Strandhagen, and F. T. S. Chan, "The link between industry 4.0 and lean manufacturing: Mapping current research and establishing a research agenda," *Int. J. Prod. Res.*, vol. 56, no. 8, pp. 2924–2940, 2018.
- [27] M. Hermann, T. Pentek, and B. Otto, "Design principles for industrie 4.0 scenarios," *Proc. Annu. Hawaii Int. Conf. Syst. Sci.*, vol. 2016-March, pp. 3928–3937, 2016.
- [28] A. El Saddik, "Digital Twins: The Convergence of Multimedia Technologies," *IEEE Multimed.*, vol. 25, no. 2, pp. 87–92, 2018.
- [29] L. Bibby and B. Dehe, "Defining and assessing industry 4.0 maturity levels—case of the defence sector," *Prod. Plan. Control*, vol. 29, no. 12, pp. 1030–1043, 2018.
- [30] V. K. Bairagi, S. L. Joshi, and S. H. Barshikar, "A Survey on Internet of Things," *Int. J. Comput. Sci. Eng.*, vol. 6, no. 12, pp. 492–496, 2018.
- [31] A. Roth, *Einführung und Umsetzung von Industrie 4.0*. 2016.
- [32] A. Lele, *Disruptive Technologies for the Militaries and Security*. 2019.
- [33] P. C. Evans and M. Annunziata, "Industrial Internet: Pushing the Boundaries of Minds and Machines," *Gen. Electr.*, no. June, p. 37, 2012.
- [34] M. Zhu and P. Liu, "Reviewing the book 'Principles of Cyber-physical Systems' from a security perspective," *ICST Trans. Secur. Saf.*, vol. 2, no. 4, p. 150480, 2015.
- [35] "MS in Cyber-Physical Systems with a concentration in Internet of Things." [Online]. Available: <https://pages.northeastern.edu/>. [Accessed: 25-Jan-2020].
- [36] "Cyber-Physical System Fundamentals (CPSF)." [Online]. Available: <https://ls12-www.cs.tu-dortmund.de/daes/en/lehre/courses/sommersemester-2019/cyber-physical-system-fundamentals-ss-2019.html>. [Accessed: 05-Jan-2020].
- [37] E. A. Lee, "Cyber physical systems: Design challenges," *Proc. - 11th IEEE Symp. Object/Component/Service-Oriented Real-Time Distrib. Comput. ISORC 2008*, pp. 363–369, 2008.
- [38] H. Seeger, "Driving force for innovation in acatech POSITION PAPER," *Acatech Position Pap.*, no. December, 2011.
- [39] National Academies of Sciences Engineering and Medicine, "A 21st Century Cyber-Physical Systems Education," *Natl. Acad. Press*, 2016.
- [40] S. Thiede, M. Juraschek, and C. Herrmann, "Implementing Cyber-physical Production Systems in Learning Factories," *Procedia CIRP*, vol. 54, pp. 7–12, 2016.
- [41] E. A. Lee and S. A. Seshia, *Introduction to Embedded Systems: A Cyber-Physical Systems Approach*. 2015.

- [42] L. Monostori *et al.*, "Cyber-physical systems in manufacturing," *CIRP Ann.*, vol. 65, no. 2, pp. 621–641, 2016.
- [43] National Science Foundation, "Workshop on Cyber-Physical Systems," 2006.
- [44] M. Burns, C. Greer, D. Wollman, and E. Griffor, "Cyber Physical Systems and Internet of Things in Industry," pp. 2839–2840, 2019.
- [45] E. A. Lee, "The past, present and future of cyber-physical systems: A focus on models," *Sensors (Switzerland)*, vol. 15, no. 3, pp. 4837–4869, 2015.
- [46] W. Gibson, "Neuromancer," 1984.
- [47] N. Wiener, "Cybernetics: Or Control and Communication in the Animal and the Machine," *MIT Press*, 1948.
- [48] S. Heath, *Embedded Systems Design*. 2003.
- [49] C. Berger, A. Hees, S. Braunreuther, and G. Reinhart, "Characterization of Cyber-Physical Sensor Systems," *Procedia CIRP*, vol. 41, pp. 638–643, 2016.
- [50] H. J. La and S. D. Kim, "A service-based approach to designing cyber physical systems," *Proc. - 9th IEEE/ACIS Int. Conf. Comput. Inf. Sci. ICIS 2010*, pp. 895–900, 2010.
- [51] 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, 2015.
- [52] J. R. Jiang, "An improved Cyber-Physical Systems architecture for Industry 4.0 smart factories," *Proc. 2017 IEEE Int. Conf. Appl. Syst. Innov. Appl. Syst. Innov. Mod. Technol. ICASI 2017*, vol. 10, no. 300, pp. 918–920, 2017.
- [53] B. Thalheim and H. Jaakkola, "Architecture-Driven Modelling Methodologies," *Front. Artif. Intell. Appl.*, no. 225, pp. 97–116, 2010.
- [54] N. Medvidovic and Richard N. Taylor, "A Classification and Comparison Framework for Software Architecture Description Languages," *IEEE Trans. Softw. Eng.*, vol. 26, no. 1, pp. 70–93, 2000.
- [55] L. Hu, N. Xie, Z. Kuang, and K. Zhao, "Review of cyber-physical system architecture," in *Proceedings - 2012 15th IEEE International Symposium on Object/Component/Service-Oriented Real-Time Distributed Computing Workshops, ISORCW 2012*, 2012, pp. 25–30.
- [56] ISA, "ISA-95, Enterprise-control system integration," 2017. [Online]. Available: <https://www.isa.org/isa95/>. [Accessed: 01-Mar-2017].
- [57] A. Vijayaraghavan, W. Sobel, A. Fox, D. Dornfeld, and P. Warndorf, "Improving Machine Tool Interoperability Using Standardized Interface Protocols: MT Connect," *Proc. 2008 Int. Manuf. Sci. Eng. Conf. MSEC2008 Oct. 7-10, 2008, Evanston, Illinois, USA*, 2008.
- [58] M. A. Pisching, A. A. Tasca, M. A. O. Pessoa, F. Junqueira, and P. E. Miyagi, "Arquitetura para desenvolvimento de sistemas ciber-físicos aplicados na indústria 4.0," in *XII Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente*, 2017.
- [59] C.-B. Zamfirescu, B.-C. Pirvu, D. Gorecky, and H. Chakravarthy, "Human-centred Assembly: A Case Study for an Anthropocentric Cyber-physical System," *Procedia Technol.*, vol. 15, pp. 90–98, 2014.
- [60] C. B. Zamfirescu, B. C. T. Pirvu, J. Schlick, and D. Zuehlke, "Preliminary insides for an anthropocentric cyber-physical reference architecture of the smart factory," *Stud. Informatics Control*, vol. 22, no. 2, pp. 269–278, 2013.
- [61] Y. Liu, Y. Peng, B. Wang, S. Yao, and Z. Liu, "Review on cyber-physical systems," *IEEE/CAA J.*

- Autom. Sin.*, vol. 4, no. 1, pp. 27–40, 2017.
- [62] L. Pires, “Sistemas ciber-físicos: o futuro da Manutenção Industrial ?,” *Inst. Educ. Técnica*, no. November 2016, 2018.
- [63] P. Hehenberger, B. Vogel-Heuser, D. Bradley, B. Eynard, T. Tomiyama, and S. Achiche, “Design, modelling, simulation and integration of cyber physical systems: Methods and applications,” *Comput. Ind.*, vol. 82, no. October, pp. 273–289, 2016.
- [64] J. C. Jensen, D. H. Chang, and E. A. Lee, “A model-based design methodology for cyber-physical systems,” *IWCMC 2011 - 7th Int. Wirel. Commun. Mob. Comput. Conf.*, pp. 1666–1671, 2011.
- [65] G. Karsai and J. Sztipanovits, “Model-integrated development of cyber-physical systems,” *Lect. Notes Comput. Sci. (including Subser. Lect. Notes Artif. Intell. Lect. Notes Bioinformatics)*, vol. 5287 LNCS, pp. 46–54, 2008.
- [66] E. A. Lee and S. Seshia, *Introduction to Embedded Systems - A CPS Approach*. 2017.
- [67] P. Peças, D. Jorge, and M. Barros, “Design of Cyber-Physical Systems.” Instituto Superior Técnico, 2019.
- [68] J. E. Kim and D. Mosse, “Generic framework for design, modeling and simulation of cyber physical systems,” *ACM SIGBED Rev.*, vol. 5, no. 1, pp. 1–2, 2008.
- [69] V. Prasad and S. H. Son, “Design suite for deeply embedded cyber physical systems,” *ACM SIGBED Rev.*, vol. 5, no. 1, pp. 1–2, 2008.
- [70] M. Švéda, M. Sveda, and R. Vrba, “A Cyber-Physical System Design Approach,” *ICONS 2011 Sixth Int. Conf. Syst.*, no. c, pp. 12–18, 2011.
- [71] C. Zheng, J. Le Duigou, P. Hehenberger, M. Bricogne, and B. Eynard, “Multidisciplinary integration during conceptual design process: A survey on design methods of cyber-physical systems,” *Proc. Int. Des. Conf. Des.*, vol. DS 84, pp. 1625–1634, 2016.
- [72] E. Hozdić, “Smart factory for industry 4.0: A review,” *Int. J. Mod. Manuf. Technol.*, vol. 7, no. 1, pp. 28–35, 2015.
- [73] S. A. Seshia, S. Hu, W. Li, and Q. Zhu, “Design Automation of Cyber-Physical Systems: Challenges, Advances, and Opportunities,” *IEEE Trans. Comput. Des. Integr. Circuits Syst.*, vol. 36, no. 9, pp. 1421–1434, 2017.
- [74] M. Abdullah, A. Faruque, and F. Hourai, “A Model-Based Design of Cyber-Physical Energy Systems,” in *19th Asia and South Pacific Design Automation Conference (ASP-DAC)*, 2014.
- [75] I. Horváth and B. H. M. Gerritsen, “Cyber-Physical Systems: Concepts, Technologies and Implementation Principles,” in *Proceedings of TMCE 2012*, 2012, no. May.
- [76] E. Bartocci *et al.*, “Specification-Based Monitoring of Cyber-Physical Systems: A Survey on Theory, Tools and Applications,” *Springer Int. Publ.*, vol. 10457, pp. 135–175, 2018.
- [77] S. Eppinger and K. Ulrich, *Product Design and Development*, 5th ed. New York: McGraw-Hill, 2012.
- [78] A. Osterwalder and Y. Pigneur, “Business Model Generation - A handbook for visionaries, Game Changers and challengers striving to defy outmoded business models and design tomorrow’s enterprises,” *Mediev. Ous Imitation, Rewriting, Transm. French Tradit.*, pp. 45–58, 2010.
- [79] H. Kerzner, *Project Management: A Systems Approach to Planning, Scheduling, and Controlling*, 10th ed. 2009.
- [80] H. L. Gantt, “Work, Wages and Profit,” *Engineering Magazine*, New York, 1910.

- [81] S. C. Wheelwright and K. B. Clark, *Revolutionizing Product Development: Quantum Leaps in Speed, Efficiency and Quality*. New York: The Free Press, 1992.
- [82] R. Machado, “Aplicação de MFCA e métodos lean para o diagnóstico e melhoria de sistema produtivo no setor metalomecânico,” Instituto Superior Técnico, 2019.
- [83] R. B. Chase, N. J. Aquilano, and F. R. Jacobs, *Production and Operations Management*. Irwin McGraw-Hill, 1998.
- [84] A. Ralston, E. D. Reilly, and D. Hemmendinger, *Encyclopedia of Computer Science*, 4th ed. Chichester, UK: John Wiley and Sons, 2003.
- [85] Stitch a Talented Company SA, “What is data transformation: definition, benefits, and uses,” 2020. [Online]. Available: <https://www.stitchdata.com/resources/data-transformation/>. [Accessed: 02-Jun-2020].
- [86] A. Osterwalder, “What is a business model?,” 2005. [Online]. Available: <http://businessmodelalchemist.com/blog/2005/11/what-is-business-model.html>. [Accessed: 31-Mar-2020].
- [87] G. S. Day, “Is it real? Can we win? Is it worth doing? Managing risk and reward in an innovation portfolio,” *Harv. Bus. Rev.*, vol. 85, no. 12, 2007.
- [88] E. von Hippel, *The Sources of Innovation*, Oxford Uni. New York, 1988.
- [89] A. Kumar, “Component Inventory Costs in an Assembly Problem with Uncertain Supplier Lead-Times,” *IIE Trans.*, pp. 112–121, 1989.
- [90] V. Modrak and Z. Soltysova, “Process modularity of mass customized manufacturing systems: Principles, measures and assessment,” *Procedia CIRP*, vol. 67, pp. 36–40, 2018.
- [91] I. Lean Enterprise Institute, *Lean Lexicon*, 5th ed. Lean Enterprise Institute, Inc, 2014.
- [92] “Meaning of Trade-off in english,” *Cambridge University Press*. [Online]. Available: <https://dictionary.cambridge.org/dictionary/english/trade-off>. [Accessed: 14-Apr-2020].
- [93] W. J. Hopp and M. L. Spearman, *Shop Floor Control*. Long Grove, IL: Waveland Press, 2008.
- [94] C. Syverson, “What determines productivity,” *J. Econ. Lit.*, vol. 49, no. 2, pp. 326–365, 2011.
- [95] M. Rother and J. Shook, *Aprendendo a Enxergar*. Lean Press, 2012.
- [96] M. De Reuver, H. Bouwman, and T. Haaker, “Business model roadmapping: a practical approach to come from an existing to a desired business model,” *Int. J. Innov. Manag.*, vol. 17, no. 01, 2013.
- [97] A. P. B. Barquet, V. P. Cunha, M. G. Oliveira, and H. Rozenfeld, “Business Model Elements for Product-Service System,” in *Functional Thinking for Value Creation*, 2011, no. January 2015, pp. 332–337.



# ANEXOS

## A. METODOLOGIAS DE DESIGN DE CPS (CAPÍTULO 2)

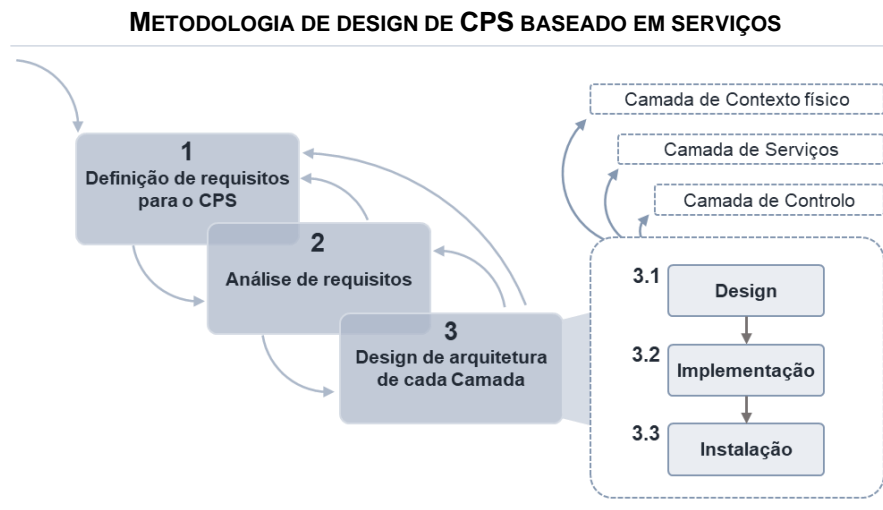


Figura A – 1. Fases de design do CPS baseado em serviços, adaptado de [41], [50].

### METODOLOGIA DE DESIGN DE CPS BASEADO EM MODELOS (MBD)

Tabela A – 1. Descrição detalhada das dez etapas do MBD de CPS [64].

#	ATIVIDADE (A)	DESCRIÇÃO
A1	DECLARAR O PROBLEMA	<b>A1.1</b> <b>Descrição primordial do problema</b> – Descrição do problema a ser resolvido utilizando linguagem simples, sem utilizar para já linguagem matemática ou terminologias tecnológicas.
		<b>A1.2</b> <b>Organização de referências</b> – que são úteis para a equipa de desenvolvimento que pode incluir colaboradores, especialistas, fornecedores e vendedores de máquinas.
		<b>A1.3</b> <b>Planeamento de projeto</b> – elaboração de um plano de projeto que especifique os requisitos, métricas, processos formais de teste e avaliação.
		<b>A1.4</b> <b>Confirmação do conhecimento e compreensão comuns</b> – do desafio por parte de todos os elementos da equipa de desenvolvimento e implementação, que podem ser de áreas científicas diferentes, e por isso os requisitos que afetam diferentes áreas têm de ser cumpridos para não gerar conflitos e ineficiências de projeto.
A2	MODELAR PROCESSOS FÍSICOS	<b>A2.1</b> <b>Começo de modelação física</b> – é nas primeiras iterações onde se deve estabelecer observações e <i>insights</i> sobre sistemas físicos relevantes, como o contexto em que o CPS reside, ou processos físicos a serem controlados.
		<b>A2.2</b> <b>Utilização de modelos matemáticos de representação do contexto físico</b> – modelos de processos físicos são representações simplificadas de sistemas reais e geralmente estão na forma de sistemas de equações diferenciais ou funções de transferência de Laplace.
		<b>A2.3</b> <b>Aperfeiçoamento iterativo</b> – o que pode começar como modelos matemáticos simples pode precisar ser refinado após o desenvolvimento de um algoritmo de controlo, especificação de hardware e teste de componentes e subsistemas.
A3	CARACTERIZAR O PROBLEMA	<b>A3.1</b> <b>Identificação e separação de parâmetros</b> – fixos, parâmetros ajustáveis e variáveis a serem controladas.
		<b>A3.2</b> <b>Identificação de valores quantitativos</b> – que caracterizam processos físicos, como espaços de configuração, limitações de segurança, conjuntos de <i>inputs</i> e <i>outputs</i> , pontos de saturação e comportamento modal.
		<b>A3.3</b> <b>Estudo das interações com meios computacionais</b> – estudo de como o processo físico em causa poderá interagir com uma computação, incluindo requisitos de latência de ponta a ponta, condições de falha e reações a ruído e quantização.

A4	DERIVAR UM ALGORITMO DE CONTROLO	A4.1	<b>Derivação de Algoritmo</b> – Determinar as condições sob as quais os processos físicos são controláveis e derivar um algoritmo de controlo adequado para ser executado por um computador incorporado.
		A4.2	<b>Aplicação de resultados da A3</b> – usar a caracterização do problema para especificar requisitos em latências, atrasos, taxas de amostragem, instabilidade e quantização, para que a dinâmica física em questão possa ser medida com precisão e controlada adequadamente; esses requisitos devem ser atendidos pela plataforma computacional usada.
		A4.3	<b>Seleção prévia de modelos computacionais</b> – em aplicativos altamente distribuídos, ou sistemas globalmente assíncronos, mas localmente síncronos, pode ser necessário selecionar modelos computacionais antes de que um algoritmo de controlo possa ser derivado.
		A4.4	<b>Aperfeiçoamento iterativo</b> – rever esta etapa depois da seleção de modelos computacionais (A5) e da especificação hardware (A6) para determinar o impacto do <i>jitter</i> de latência ou das taxas de amostragem variáveis. Estes fatores de impacto podem ter sido introduzidos por um modelo assíncrono de computação, podem ser consequência da saturação ou da interação de outros artefactos não lineares, introduzidos pelo <i>hardware</i> .
A5	SELECIONAR MODELO COMPUTACIONAL	A5.1	Um modelo computacional é um conjunto de instruções admissíveis. Estas instruções são usadas em computações, e requerem regras que governam as interações, comunicações e os fluxos de controlo de um conjunto de componentes computacionais. <b>Seleção de modelos computacionais formais</b> – um modelo computacional formal define a semântica que geralmente resulta numa maior capacidade de análise e no potencial de simular uma funcionalidade de CPS por meio do uso de ferramentas de modelação heterogénea. Os modelos descritos por modelos formais de computação podem ser mais fáceis de analisar em relação ao determinismo, tempo de execução, alcançabilidade do estado, uso de memória e latência.
		A5.2	<b>Utilização das dinâmicas do software no workflow de MBD</b> – a dinâmica de software (inerente ao modelo selecionado anteriormente) altera a evolução de um CPS. Uma vez modelada, essa dinâmica pode ser generalizada e usada num fluxo de trabalho de MBD.
		A5.3	<b>Composição de vários modelos computacionais</b> – a complexidade inerente a muitos CPS geralmente requer a composição de vários modelos de computação.
A6	ESPECIFICAR HARDWARE	A6.1	<b>Seleção do hardware</b> – selecionar o hardware capaz de suportar o contexto real, de interagir com os sistemas físicos modelados e de implementar o algoritmo de controlo.
		A6.2	<b>Análise de parâmetros de cada componente</b> – para cada componente, considerar as larguras de banda de <i>inputs</i> e <i>outputs</i> , atraso entre o <i>input</i> e o <i>output</i> , uso de energia, resoluções e taxas de medição, e parâmetros mecânicos como fator de forma, rejeição de interferência elétrica, durabilidade e tempo de vida.
		A6.3	<b>Seleção de atuadores</b> – os atuadores mecânicos devem ser capazes de produzir forças e torques acima dos valores mínimos, derivados das caracterizações dos problemas feitas anteriormente.
		A6.4	<b>Redução de custos de componentes</b> – considerar e modelar os impactos do uso de substitutos económicos para peças ideais; ter em conta que as especificações do fabricante nem sempre são precisas e que os componentes de hardware devem ser testados independentemente.
		A6.5	<b>Seleção de computador incorporado</b> – a seleção de um computador incorporado pode depender de uma compreensão mais profunda dos requisitos de latência e do tempo de execução dos algoritmos de controlo, das medições do pior caso de tempo de execução do software sintetizado e do raciocínio segundo o qual o software irá interagir com uma arquitetura de hardware específica.
		A6.6	<b>Aperfeiçoamento iterativo</b> – esta atividade pode exigir várias iterações de design e de simulação de software antes que um computador incorporado possa ser selecionado com confiança.

A7	SIMULAR	A7.1	<b>Utilização de ferramentas de simulação</b> – utilizar uma ferramenta de simulação na área de trabalho. Se for necessário usar vários modelos de computação, as ferramentas de simulação e síntese devem permitir composições e interações entre vários modelos de computação.
		A7.2	<b>Incorporação de modelos de sensores, atuadores e processos físicos</b> – dependendo da robustez do contexto de desenvolvimento, incorporar modelos de sensores, atuadores e processos físicos. Usar o design baseado em plataforma para separar a lógica da aplicação e o software específico da arquitetura em componentes modulares, o que pode melhorar a portabilidade do código, reduzir o impacto da alteração dos componentes de hardware e permitir que os componentes sejam reutilizados em outros contextos.
		A7.3	<b>Elaboração de modelos de componentes e subsistemas individuais</b> – são tão importantes quanto um modelo completo de ponta a ponta. Os modelos de componentes fornecem um equipamento de teste para construção, verificação de software sintetizado e teste. Se nenhuma ferramenta de modelação puder descrever completamente o sistema, para cada subsistema, usar a ferramenta de modelagem que melhor captura sua dinâmica. Embora as simulações disjuntas não possam representar relações entre sinais que ultrapassam os limites do subsistema ou o comportamento das composições desses subsistemas, o exercício facilita a co-iteração da modelação, simulação e testes físicos.
A8	CONSTRUIR	A8.1	<b>Construção do dispositivo de acordo com as especificações</b> – observando onde foram feitas exceções que podem afetar a modelação anterior.
		A8.2	<b>Planeamento da construção iterativa</b> – de uma maneira que permita que componentes e subsistemas individuais sejam testados em relação a modelos teóricos, o que facilita a co-iteração entre simulação e teste.
A9	SINTETIZAR SOFTWARE	A9.1	<b>Utilização de sintetizadores de código</b> – às vezes, os sintetizadores de código são incorporados nos ambientes de simulação de desktop. Podem suportar diretamente o computador incorporado a ser usado ou o código genérico pode ser sintetizado e vinculado a um código manuscrito específico da arquitetura. Se a síntese do código for inviável ou não estiver disponível, o código manuscrito deve seguir cuidadosamente a semântica dos modelos de computação selecionados.
		A9.2	<b>Validação da lógica da código sintetizado</b> – se o sintetizador de código produz código que executa fielmente a semântica dos modelos de computação usados, a lógica do código sintetizado é correta na construção.
		A9.3	<b>Verificação do comportamento do código no tempo</b> – no entanto, o comportamento no tempo deve ainda ser verificado, pois os geradores e compiladores de código podem introduzir artefactos de tempo do <i>software</i> , e os recursos de <i>hardware</i> , como <i>pipelines</i> e <i>caches</i> , podem apresentar instabilidade.
		A9.4	<b>Verificações independentes de código</b> – outras restrições, como a presença de memória ou utilização do processador, também podem exigir verificação independente. O tempo e outras restrições devem ser verificados em relação aos modelos existentes.
A10	VERIFICAR, VALIDAR E TESTAR	A10.1	<b>Testes independentes de cada componente e subsistema</b> – configurar parâmetros ajustáveis para criar ambientes de teste o mais simples possível. Os sistemas computacionais podem ser isolados dos sistemas físicos por meio de testes de <i>hardware</i> no circuito, onde o <i>hardware</i> programável, simula o <i>feedback</i> de processos físicos ou outros processos computacionais.
		A10.2	<b>Medições do tempo de execução e latência</b> – podem ser usadas para refinar modelos anteriores, e resultados inesperados de testes podem apontar para erros na modelação ou implementação.
		A10.3	<b>Comportamento de algoritmos</b> – a verificação e validação formais fornecem informações sobre o comportamento de um algoritmo em relação a todas ou certas combinações dos seus <i>inputs</i> ou ao longo do tempo.
		A10.4	<b>Especificações e requisitos</b> – declarar com precisão os requisitos e traduzi-los numa especificação formal para verificação e validação.
		A10.5	<b>Listagem de invariantes</b> – listar os invariantes que devem ser verificados durante o teste. Verificação e validação são talvez os aspetos mais difíceis no design de um CPS.

## B. CONTEÚDOS DE PDD APLICÁVEIS AO CPS (CAPÍTULO 3)

### ETAPA 13 – EXECUÇÃO DE PROJETO

Tabela B – 1. Ações de gestão e execução de projetos, ao longo de três vetores adaptado de [77].

	AÇÃO	DESCRIÇÃO
COORDENAÇÃO	<b>Comunicação informal</b>	Responsabilidade de um líder de chefiar e coordenar a equipa.
	<b>Realização de reuniões</b>	Preparadas por escrito e conduzidas por um moderador.
	<b>Exposição de horário e agenda</b>	Através de cronogramas Gantt e tabelas PERT (ver Etapa 9).
	<b>Atualização semanal regular</b>	Escrever e distribuir memorandos do <i>status</i> da semana (em papel, ou por mensagem de <i>e-mail</i> , <i>voice-mail</i> ou partilha de vídeo na <i>intranet</i> ).
	<b>Elaboração de incentivos à excelência de performance</b>	Passar a mensagem de que bons desempenhos e resultados, individuais ou coletivos, são altamente valorizados. É responsabilidade de <i>managers</i> funcionais e/ou de projeto de elaborar avaliações de performance que merecem promoções, aumentos por mérito e premiação de bônus e benefícios.
	<b>Elaboração e disponibilização da documentação de projeto (outputs de cada etapa)</b>	Cada um dos métodos apresentados tem associado um sistema de informação <sup>16</sup> que auxilia a equipa de projeto, na medida em que providencia instruções lógicas das tarefas, e suporta a tomada de decisões.
AVALIAÇÃO	<b>Supervisão e registo de ocorrências</b>	Presença de líderes e <i>managers</i> nas reuniões, onde as ações de coordenação (descritas acima) devem ser postas em prática. Adicionalmente, as reuniões proporcionam a recolha de formal e informal de informação.
	<b>Avaliação do status do projeto</b>	Se a recolha e o tratamento de informação forem eficientes, a avaliação dos progressos e resultados é facilitada. Devem ser avaliados os diversos <i>outputs</i> do projeto, com a finalidade de evidenciar áreas de risco e gerar ideias que enderecem esses problemas.
	<b>Avaliação de projeto post mortem</b>	Geralmente é uma discussão aberta dos pontos fortes e fracos do plano do projeto, dos processos de desenvolvimento empregados, dos resultados comerciais e técnicos, e da qualidade da execução. Por vezes, esta discussão é facilitada por um consultor externo ou por alguém da empresa que não esteve envolvido no projeto.
CORREÇÃO	<b>Acerto das reuniões</b>	Alterações de <i>timing</i> ou a frequência das reuniões, para corrigir problemas de inutilidade, perda de tempo, falta de assiduidade e eficiência.
	<b>Acerto na alocação de recursos humanos</b>	Mudanças no staff do projeto, ou alocações da equipa de modo a que os vários membros estejam juntos fisicamente.
	<b>Correção de prioridades</b>	Apelar ao enfoque do esforço na cadeia crítica de tarefas, corrigindo quem não respeita as prioridades da sequência de tarefas.
	<b>Recurso a ajudas externas</b>	Envolvimento de recursos externos (firmas de consultoria ou parceiros).
	<b>Acertos no cronograma</b>	Mudanças e reestruturações da sequência e <i>timings</i> das atividades (cronogramas PERT), a fim de evitar sobrecargas ou desopressões excessivas, melhorar a lógica das atividades e assim aumentar a eficiência do projeto.
	<b>Mudanças no âmbito de projeto</b>	Caso a generalidade das metas não estejam a ser atingidas atempadamente, a equipa deve estreitar as janelas de oportunidade do projeto, identificar um objetivo alternativo.

<sup>16</sup> Os sistemas de informação são todos os meios estruturados que a equipa de desenvolvimento usa para trocar informações, e não apenas as ICT usadas pela equipa [77].

## C. ETAPAS DA PROPOSTA DE METODOLOGIA DE DESIGN CONCEPTUAL DE CPS (CAPÍTULO 4)

Descrição detalhada dos passos das várias etapas da metodologia proposta.

### ETAPA 1 – IDENTIFICAÇÃO DE OPORTUNIDADES DO BM

Nota geral: o objetivo desta etapa é obter descrições sucintas e *high-level* de oportunidades de desenvolvimento de um CPS que melhor satisfaz as necessidades do mercado; não se deve procurar para já chegar ao nível do detalhe, apenas identificar janelas de oportunidade de CPSDD.

#### 1. RECOLHA – Recolher toda a informação disponível sobre o negócio

- 1.1. **Solicitar documentos** – documentos do BM, como o BM Canvas<sup>17</sup> [86], registos de e-mails de clientes, inventários de recursos disponíveis, situação atual do negócio; toda esta informação deve estar fixada e pré-estabelecida pela empresa.
- 1.2. **Solicitar informação essencial** – após a interpretação (passo 2), caso falte alguma informação essencial nos documentos recolhidos, esta deve ser pedida aos responsáveis do negócio.

#### 2. INTERPRETAÇÃO – Descrever a interação do CPS com o mercado

Nota geral: O objetivo deste passo é a interpretação do BM da empresa, de forma a sistematizar a informação necessária para o passo seguinte onde se identificam oportunidades de desenvolvimento de CPS. O objetivo não é interpretar melhorias na proposição de valor ou na sua forma de entrega. O CPS a desenvolver permitirá, por exemplo, maiores níveis de certeza e eficácia, menos erros, melhor comunicação e identificação de desperdícios mais célere, permitindo assim à empresa cumprir o BM que estabeleceu antes de forma mais eficaz e eficiente. Ou seja, o CPS é desenhado para cumprir melhor o BM, e não para o alterar, ou para alterar a forma como a empresa trabalha ou planeou trabalhar.

- 2.1. **Selecionar a informação** relevante para compreender como deve o CPS funcionar e que características deve ter, para melhor satisfazer as necessidades do mercado de clientes; deve-se, portanto, sistematizar a informação de acordo com as seguintes diretrizes:
  - 2.2. Descrever a interação do CPS com o mercado:
    - 2.2.1. **Segmentos de clientes** – identificar que clientes o CPS irá atender; segmentar vários conjuntos de clientes com base nas suas diferentes necessidades e atributos que o CPS irá atender.
    - 2.2.2. **Canais de clientes** – identificar os canais de alcance e interação com os clientes que o CPS irá suportar; meios segundo os quais a empresa irá distribuir a proposta de valor do negócio de forma rápida, eficiente e económica; os canais podem ser próprios (frente de loja), podem ser de parceiros (distribuidores), ou combinações de ambos.
    - 2.2.3. **Relação com clientes** – tipo de relacionamento que o CPS irá alavancar com os segmentos de clientes.

Este passo consiste na especificação de três vertentes:

- Como irá o CPS suportar a obtenção de novos clientes?
- Como irá o CPS suportar a atividade de manter os clientes a comprar ou usar os seus produtos ou serviços?
- Como irá o CPS alavancar o aumento de receitas provenientes dos atuais clientes?

As várias formas de relação com o cliente, que o CPS pode alavancar, incluem:

- **Assistência pessoal** – assistência na forma de interação colaborador-cliente, durante a vendas e/ou pós-venda;
- **Assistência pessoal dedicada** – a assistência pessoal mais íntima e prática na qual um representante de vendas é designado para lidar com todas as necessidades e perguntas de um conjunto especial de clientes;
- **Autoatendimento** – interação indireta entre a empresa e os clientes, através das ferramentas necessárias para que os clientes se sirvam a si mesmos de maneira fácil e eficaz;
- **Serviços automatizados** – um sistema semelhante ao autoatendimento, mas mais personalizado, pois tem a capacidade de identificar clientes individuais e suas preferências;
- **Comunidades** – a criação de uma comunidade permite interações diretas entre diferentes clientes e a empresa; a plataforma da comunidade produz um cenário em que o conhecimento pode ser partilhado e os problemas são resolvidos entre clientes diferentes;
- **Cocriação** – relação criada por meio do input direto do cliente no resultado final dos produtos/serviços da empresa.

2.3. **Descrever a proposição de valor** que o CPS irá alavancar, para melhor satisfazer os clientes:

- 2.3.1. **Descrição dos produtos e serviços** – que o CPS irá produzir ou suportar, que constituem a oferta da empresa para atender às necessidades dos diversos segmentos de clientes identificados.
- 2.3.2. **Descrição dos vários elementos do valor proposto** – o CPS poderá potenciar a oferta com elementos como o desempenho, personalização, concretização célere do trabalho, design, preço, redução de custo, redução do risco, acessibilidade, conveniência, usabilidade; pode ser quantitativa (e.g. preço, eficiência, *lead time*) ou qualitativa (e.g. experiência do consumidor, usabilidade)
- 2.4. **Descrever a interação do CPS com fornecedores e parceiros** – além da interação com o mercado de clientes, através dos canais de distribuição, é necessário descrever a interação do CPS com o mercado de fornecedores e parceiros; é relevante identificar e descrever as alianças comerciais e relações comprador-fornecedor que o CPS irá suportar.

#### 3. IDENTIFICAÇÃO – Identificar e articular oportunidades de desenvolvimento de CPS

- 3.1. **Elaborar uma lista de atividades e recursos necessários** à execução da proposição de valor descrita no passo anterior, que o CPS poderia concretizar; deve-se, portanto, sistematizar a informação de acordo com as seguintes diretrizes:

---

<sup>17</sup> O BMC é uma ferramenta usual de gestão estratégica e de inicialização lean para desenvolver novos modelos de negócio ou documentar modelos de negócio existentes [96], [97]. Esta foi a ferramenta que serviu de base para a Etapa 1 da proposta de metodologia.

- 3.1.1. Atividades** – Descrever as atividades necessárias para criar e entregar o valor proposto, que o CPS poderia suportar, i.e. quais as atividades na execução da proposta de valor que podem requerer operações suportadas pelo CPS.
- 3.1.2. Recursos** – Descrever os recursos<sup>18</sup> necessários para criar e entregar o valor proposto, que o CPS poderia fornecer – quais os níveis 8C e respetivas medidas de ação que poderiam ser necessárias para possibilitar, suportar e promover a criação e entrega de valor; quais os requisitos de CPS (ver Figura 2.6 e tabelas anteriores) que poderiam ser necessários.
- 3.2. Articular declarações de oportunidade** de desenvolvimento de CPS, através de uma descrição primordial sucinta.

#### 4. AVALIAÇÃO – Apresentar, avaliar, triar e refinar oportunidades

**Nota geral:** este passo pode ser realizado por meio de um *workshop* onde é importante que estejam presentes responsáveis da empresa para ajudar na avaliação.

A linha de atividades é a seguinte:

- 4.1. Apresentar e exposição das oportunidades** – as apresentações podem e devem ser suportadas por um único slide, uma ficha ou uma folha de *flip-chart*; é recomendável que cada apresentação tenha um tempo limitado, e que cada apresentador cumpra o mesmo prazo e formato; as Declarações de cada oportunidade devem ser distribuídas antes do *workshop*; a exposição das fichas de cada apresentação deve ser feita de forma lógica e sistemática, nas paredes da sala, em quadros organizados com os diferentes temas, impressos em formato A0/A1.
- 4.2. Discutir** – após as apresentações, deve ser dado um tempo para esclarecimento de dúvidas e argumentação a favor e contra cada uma das oportunidades de desenvolvimento apresentadas.
- 4.3. Avaliar e triar** – através de um sistema de multivotação, os avaliadores recebem “pontos” (*stickers*) para atribuírem às oportunidades que preferem. É recomendável que se avance não só com as oportunidades que têm mais votos, mas também com as que tiveram menos votos, mas muito entusiasmo e bons argumentos. Opiniões fortes geralmente podem gerar ideias excecionais. O objetivo é eliminar eficientemente as oportunidades que por alto não justificam o investimento, não eliminando as ideias intrínsecas que tenham potencial.
- 4.4. Refinar** – deve-se apostar em várias oportunidades para a seleção final, resolvendo as incertezas associadas, adicionando informação, conjugando com a informação das oportunidades descartadas e respondendo aos problemas dos pontos negativos.

#### 5. SELEÇÃO – Priorizar e selecionar oportunidades de desenvolvimento de CPS finais

Após a triagem de oportunidades de desenvolvimento, o passo seguinte é chegar a uma lista final de oportunidades

**5.1. Mapear as oportunidades ao longo de dimensões úteis.** Estas duas técnicas podem ser ambas usadas:

- 5.1.1. Checklists** – onde os projetos são avaliados por meio de uma lista de perguntas de sim / não (e cada projeto deve atingir todas ou uma certa percentagem de respostas “sim”). A abordagem *Real-Win-Worth-It* [87] (RWW) é bastante usual para a examinação final. Deve-se rever toda a informação resultante dos passos 3 e 4 e selecionar as oportunidades que cumprem os seguintes critérios:
- **Is it real?** – A oportunidade de desenvolvimento é real? A atividade suportada pelo CPS é realmente viável, possível de implementar, conveniente e eficiente? O recurso é realmente necessário? Está disponível, acessível? É viável?
  - **Can we win?** – Poderá a empresa ter benefícios e maior sucesso com esta oportunidade de desenvolvimento? Poderão as necessidades de negócio ser satisfeitas de melhor forma? Irão os clientes ser satisfeitos de melhor maneira? É sustentável? Trará vantagem competitiva? É o timing certo para o seu desenvolvimento?
  - **Is it worth doing?** – Será o retorno do investimento no desenvolvimento da oportunidade adequado? Irá a oportunidade de desenvolvimento possibilitar reduções de custos? Irá a oportunidade potenciar maiores rendimentos? Os riscos do desenvolvimento são aceitáveis para a empresa? O que poderia correr mal (riscos técnicos)?

**5.2. Ordenar as oportunidades por ordem de prioridade** de desenvolvimento elaborando uma tabela de declarações de oportunidade finais, que serão o objeto de planeamento na etapa seguinte e de desenvolvimento nas fases seguintes.

O resultado final desta Etapa 1 poderia resultar no exemplo apresentado na Tabela 4.2.

## ETAPA 2 – PLANEAMENTO DE PRÉ-PROJETO DE CPS

### 1. DECLARAÇÃO DE MISSÃO – elaborar a Declaração de Missão do projeto de desenvolvimento

#### 1.1. Elaborar a Declaração de Missão

Ver exemplo da Tabela 4.3.

O objetivo é elaborar uma tabela que consista num guia para o desenvolvimento. Para o efeito, pode ser necessário repetir alguns passos da etapa anterior, a fim de solicitar a informação que esteja a faltar. Adicionalmente, pode-se “somar” oportunidades que estejam relacionadas, resultando num só tópico. A tabela deve incluir as seguintes colunas:

- 1.1.1. Breve descrição do CPS** – evitando implicar conceitos específicos, este campo deve consistir numa frase curta que descreva cada um dos tópicos de desenvolvimento do CPS; o mote deve ser “desenvolver um CPS que <tópico>”
- 1.1.2. Proposta de benefício** – para cada um dos tópicos elaborados acima, deve-se articular os motivos críticos pelos quais a empresa investiria no CPS.
- 1.1.3. Contextos alvo da VC** – listar os diferentes contextos da VC do BM em questão que serão alvo das capacidades do CPS. Podem ser processos ou atividades, desde o lançamento da ordem encomenda, ao abastecimento de m-p, produção, operação, logística, supervisão, gestão, controlo, etc. Deve-se descrever também sucintamente o ambiente físico (local nas implantações da empresa, por exemplo). É necessário definir contextos primários e contextos secundários que devem ser minuciosamente estudados no processo de desenvolvimento.
- 1.1.4. Participantes na VC** – a par de cada contexto listado no tópico 1.3, para garantir que muitos dos problemas subtis do desenvolvimento são abordados, deve-se listar explicitamente todos os intervenientes e partes interessadas, i.e. entidades internas (pessoas, departamentos, órgãos da empresa), ou externas (fornecedores, parceiros, clientes), ou seja,

<sup>18</sup> Ver nota de rodapé da página 31.

todas as pessoas afetadas pelo sucesso ou fracasso do tópico de desenvolvimento de CPS em questão; devem ser anotados os nomes e contactos dessas pessoas.

- 1.1.5. **Objetivos principais do projeto de desenvolvimento** – além dos objetivos do projeto que apoiam a estratégia corporativa, estes objetivos geralmente incluem objetivos de negócio como aumento de vendas, ou de suporte e alavanca do negócio, como produtividade, performance, tempo, custo, qualidade ou outros requisitos de CPS apresentados na Tabela 2.12.
- 1.1.6. **Ponto de partida, restrições e pressupostos de prioridade que orientam o processo de desenvolvimento** – o ponto de partida resume a situação atual relativa ao tópico de desenvolvimento em questão, a fim de introduzir a identificação de necessidades e desenvolvimento de conceitos relativos ao respetivo contexto. Os pressupostos devem ser elaborados com cuidado, porque embora restrinjam a variedade de conceitos possíveis de soluções de CPS, ajudam a manter um âmbito de projeto com margem de manobra. As informações podem ser anexadas à Declaração de Missão para documentar decisões sobre suposições e restrições.

## 2. ROADMAP – planejar a sequência e timings do projeto de desenvolvimento

**Nota geral:** O objetivo deste passo é esboçar um plano *high-level* dos vários subprojetos de CPSDD. Pretende-se lançar prazos que conduzam o projeto e facilitem a estimativa de recursos humanos necessários. Após a identificação de necessidades (Etapa 3) e do desenvolvimento de conceitos e especificações (Etapas 4 a 8), um conhecimento mais profundo dos desafios terá sido obtido, e no planeamento de projeto (Etapa 9), este planeamento de pré-projeto deve ser refinado.

Devem ser seguidos os seguintes passos:

- 2.1. **Aprimorar os resultados da Etapa 1, se necessário** – como o tempo e a alocação de recursos são reservados aos projetos mais promissores, algumas oportunidades de CPS invariavelmente competem por poucos recursos, pelo que pode ser necessário “podar” o conjunto de projetos de oportunidades a serem alavancados, e para isso pode ser necessário iterar a etapa 1.
- 2.2. **Elaborar o roadmap de desenvolvimento**
  - 2.2.1. **Estimar duração** – Realizar uma primeira estimativa da duração de cada subprojeto, baseada na urgência do começo de utilização das propostas de benefício e numa estimativa da duração das atividades.
  - 2.2.2. **Distribuir os projetos das oportunidades de desenvolvimento** – sequenciados no tempo e agrupados em subprojetos de CPSDD.
  - 2.2.3. **Esboçar milestones** de projeto, por exemplo, datas dos primeiros testes, ou o começo de utilização do CPS em contexto real.
  - 2.2.4. **Atualizar** o plano periodicamente, à medida que se for avançando nas fases e se for aprofundando os desafios.

## 3. EQUIPA DE DESENVOLVIMENTO – planejar e organizar as equipas de desenvolvimento

Relembrando a importância de ser um trabalho conjunto, em constante colaboração e cooperação da empresa alvo e da equipa de desenvolvimento externa, deve ser elaborado um documento com uma tabela que inclua os *outputs* dos seguintes passos:

- 3.1. **Requisitar colaboradores da empresa em questão** – baseado na informação da coluna “participantes” da Declaração de Missão do Projeto, informar a empresa dos recursos necessários para formar a equipa de desenvolvimento. O *output* pode ser uma lista de pessoas com os contactos, departamentos e secções, especialidades e disponibilidades.
- 3.2. **Definir a equipa contratada** – estimar e definir os recursos humanos da empresa contratada, necessários para cada tópico e fase de desenvolvimento. O *output* é uma lista de pessoas e as respetivas horas de alocação diárias/semanais.
- 3.3. **Definir a liderança de projeto** – incluindo na tabela quais dos elementos contratados são líderes de projeto.

## 4. APROVAÇÃO – aprovar e dar início ao primeiro projeto de CPSDD

- 4.1. **Rever e refletir sobre os resultados da Etapa 2** – confirmar as decisões dos passos 1, 2 e 3.
- 4.2. **Obter a aprovação da primeira iteração do projeto de CPSDD** – aprovação formal, acordo de termos e assinatura de contrato.

# ETAPA 3 – IDENTIFICAÇÃO DE NECESSIDADES

## 1. RECOLHA – Recolher dados brutos da VC de produção e operações envolvidas

As diretrizes seguintes orientam as reuniões, observações e registos que permitirão a recolha eficaz de dados brutos.

- 1.1. **Reuniões** – Preparar e realizar reuniões com participantes nos contextos reais da VC, recolhendo informação:
  - 1.1.1. **Realizar “entrevistas” individuais** – onde um ou mais consultores estudam, esmiúçam e discutem as necessidades com um só colaborador da empresa. As entrevistas geralmente são realizadas no contexto de produção/de operações em causa. É recomendável realizar “entrevistas” com uma só pessoa de cada vez, a fim de recolher a contribuição individual que poderia ficar perdida numa reunião em grupo. Devem ser utilizados guias de reuniões pré-elaborados.
  - 1.1.2. **Realizar “focus groups” com vários participantes** – onde um consultor atua como moderador e facilitador da discussão entre vários colaboradores no contexto em questão, incluídos na *workforce* ou não. Deve-se preparar a reunião, levar sistematizada toda a informação do processo de desenvolvimento disponível até ao momento, e colocar questões que suscitem uma discussão orientada. Outros consultores que não estão a moderar o *focus group* devem ir tomando nota das informações que vão surgindo. Devem também ser utilizados guias de reuniões pré-elaborados.
  - 1.1.3. **Realizar reuniões suficientes** – as reuniões devem ser conduzidas numa sequência lógica, onde os resultados das reuniões a montante são levados, e devem continuar a acontecer até não mais necessidades forem encontradas.
- 1.2. **Observar as atividades do contexto em questão**

**Nota:** esta tarefa deve ser desempenhada no caso de os colaboradores que fazem parte da equipa de desenvolvimento não terem um conhecimento avançado dos processos e operações em causa.

Este ponto consiste em examinar os participantes a trabalhar no contexto em questão atual, e.g. engenheiros/operadores a usarem as máquinas/ferramentas/dispositivos existentes ou a realizar uma tarefa para a qual a proposta de benefício se destina. Estas observações podem revelar detalhes importantes sobre as necessidades do engenheiro/operador e do sistema produtivo

em si. Devem ser realizados dois tipos de observação do contexto real de utilização:

- 1.2.1. **Observação passiva** – sem nenhuma interação com o participante.
- 1.2.2. **Observação ativa** – envolve trabalho lado a lado com o participante, permitindo aos membros da equipa de desenvolvimento uma experiência de utilização em primeira mão dos meios produtivos/operacionais.
- 1.3. **Dar prioridade às reuniões/observações de participantes principais (lead users)** – analogamente ao que afirmou von Hippel [88], os *lead users* são os utilizadores (participantes que utilizam diretamente as máquinas e interagem com o contexto produtivo) que experienciam necessidades antes dos outros e são quem mais poderá beneficiar com as inovações de CPS. São fontes de dados particularmente úteis por duas razões: (i) geralmente conseguem articular as necessidades emergentes, porque já tiveram que lidar com inadequações nos processos; e (ii) já podem ter tido ideias de soluções para as suas necessidades.
- 1.4. **Realizar uma obtenção célere de dados** – sabendo que o objetivo é obter uma expressão honesta das necessidades, e não convencer o operador do que ele precisa, as seguintes indicações devem ser seguidas para levar uma interação efetiva com os entrevistados:
  - **“Go with the flow”** – se o entrevistado estiver a fornecer informações úteis, a conformidade com o guia de entrevistas não deve ser motivo de preocupação. O objetivo é reunir dados importantes sobre as necessidades do cliente, e não completar o guia de entrevista no tempo previsto.
  - **Usar estímulos visuais** – apresentar soluções existentes na *Smart Manufacturing* nos vários níveis de maturidade, ou possíveis funcionalidades e produtos de CPS relacionados com o problema em questão; no final da sessão podem até ser apresentados conceitos preliminares do produto para obter as reações iniciais dos clientes a várias abordagens.
  - **Suprimir hipóteses preconcebidas sobre a tecnologia relacionada com a oportunidade de CPS** – devem ser evitadas as discussões em que os entrevistados fazem suposições sobre o conceito de CPS que esperam que atenda às suas necessidades. No entanto, quando um entrevistado refere uma tecnologia sem muito fundamento, a equipa de desenvolvimento deve investigar a necessidade subjacente sobre a qual o entrevistado acredita que a solução sugerida satisfaria.
  - **Pedir ao entrevistado que demonstre a necessidade e/ou tarefas típicas relacionadas** – no seguimento do ponto 1.2, pedir uma demonstração no contexto real do posto de trabalho, comprovando que existe mesmo uma necessidade.
  - **Estar alerta para surpresas e expressões de necessidades latentes** – se um entrevistado mencionar algo surpreendente e aparentemente importante, estimular com mais perguntas nessa linha. Só assim se abordam necessidades que normalmente não são atendidas nem articuladas.
  - **Prestar atenção a informação não verbal** – muitas dimensões humanas (como o conforto, facilidade de utilização, insatisfação com a adequação da solução) devem ser interpretadas nas expressões faciais e comportamentais.
- 1.5. **Registar interações com os entrevistados** – quatro métodos podem ser utilizados:
  - **Notas manuscritas** – é o método mais comum de documentar uma entrevista. Nomear um anotador principal, permitindo que outro entrevistador se concentre no questionamento eficaz.
  - **Gravação de áudio** – é fácil e ágil, mas transcrever a gravação em texto pode consumir muito tempo, e contratar alguém para o fazer pode ser caro, além de ser intimidador para o entrevistado.
  - **Gravação de vídeo** – a gravação de vídeo é quase sempre usada para documentar as sessões de *focus group*, e as observações no chão de fábrica. Além disso é útil para:
    - ✓ Manter toda a equipa de desenvolvimento atualizada e obter provas que corroborem o investimento de recursos;
    - ✓ Facilitar a identificação de necessidades latentes;
    - ✓ Capturar aspetos do contexto de utilização final, que serão importantes para o processo de CPSDD.
  - **Fotografias estáticas** – oferece muitos dos benefícios da gravação de vídeo, e geralmente é menos invasivo.
- 1.6. **Registar** – é importante que o registo da informação (ponto anterior) seja feito de forma organizada e estruturada. Para isso devem existir *templates* físicos e virtuais de notas, folhas de *excel* e *word*, e pastas de arquivos organizadas, físicas e/ou virtuais.
- 1.7. **Organizar a informação por atividades da VC** – toda a informação recolhida nos subpassos anteriores deve ser estudada e organizada por atividades da VC.

## 2. INTERPRETAÇÃO – Interpretar os dados brutos e identificar necessidades

As necessidades de produção e operações devem ser escritas em forma de declaração. Neste processo de escrita devem ser seguidas as seguintes medidas de ação:

- 2.1. **Trabalhar em equipa** – deve-se envolver mais do que uma pessoa no processo de tratamento de dados brutos, para obter várias abordagens e, por conseguinte, mais necessidades.
- 2.2. **Elaborar matriz de identificação e declaração de necessidades** (ver exemplo de matriz na Tabela 4.5):
  - 2.2.1. **Linhas** – as linhas da matriz são populadas com as etapas da VC em causa.
  - 2.2.2. **Colunas** – as colunas da matriz são as oportunidades de desenvolvimento e os cinco P's de gestão de operações [83]:
    - **People** – Pessoas – mão-de-obra direta e indireta em cada etapa.
    - **Plants** – Instalações – instalações fabris onde as etapas são realizadas.
    - **Parts** – Partes – materiais que passam pelas etapas, e os produtos resultantes.
    - **Processes** – Processos – equipamentos e processamentos através dos quais a produção e as operações são realizadas.
    - **Planning and control systems** – Planeamento e sistemas de controlo – procedimentos e informações utilizados em cada etapa para operar o sistema.
- 2.3. **Preencher matriz** – Interpretação dos resultados do passo 1 e preenchimento da matriz. Devem ser seguidos os seguintes passos:
  - 2.3.1. **Identificação das etapas** da VC que são relevantes para as oportunidades de desenvolvimento, através do preenchimento nas colunas das oportunidades.
  - 2.3.2. **Identificação sistemática de necessidades e elaboração das declarações de necessidades**

Cada célula é referente a uma dimensão de análise e interpretação de dados e identificação de necessidades da etapa da linha correspondente. Ou seja, se relativamente à oportunidade A houver necessidades de atributos de CPS em Processos, na etapa 1, deve-se colocar a letra A na linha 1 e na coluna “Processos”. A Declaração de necessidades deve ser elaborada em simultâneo. À medida que se percorre cada dimensão da análise, devem ser declaradas as necessidades que sustentam o preenchimento da matriz, através do preenchimento de uma tabela como a Tabela E – 1.

Esta transformação de oportunidades de desenvolvimento em necessidades de CPS (i.e. atributos, funcionalidades e recursos



necessitados pela Empresa A que podem ser resolvidos por um CPS) deve basear-se não só na informação recolhida no passo 1 (ver Anexo D) como também na informação mapeada na Declaração de Missão (Tabela 4.3), nomeadamente nas colunas “Proposta de benefício”, “Objetivos” e “Ponto de partida e restrições”.

Adicionalmente, devem ser respeitadas as seguintes regras:

- **Evitar dependência de uma solução tecnológica específica** – a declaração de necessidade deve ser expressa em termos independentes de uma solução tecnológica específica.
- **Usar frases positivas**, não negativas sempre que possível.
- **Evitar o termo “deve”** – pois este implica um nível de importância para a necessidade. A avaliação da importância de cada necessidade só deve ser feita no passo 4 desta Etapa 3.
- **Fazer referência à declaração da organização** – para evitar a perda de informações, ao escrever a necessidade interpretada, deve-se fazer referência à respetiva declaração, como está elaborado ao dividir em linhas na Tabela E – 1.

O resultado dos passos 1 e 2 deve ser uma lista de dezenas de declarações de necessidades interpretadas (ver exemplo na Tabela E – 1).

### 3. ORGANIZAÇÃO – Organizar necessidades numa hierarquia de macro e micro necessidades

O objetivo é chegar a uma tabela como o exemplo da Tabela E – 2. Devem ser seguidos os seguintes passos:

- 3.1. **Eliminar declarações redundantes** – juntar as necessidades iguais em micro-necessidades.
- 3.2. **Agrupar as interpretações de acordo com a semelhança das necessidades que expressam** – criar grupos de acordo com a funcionalidade ou recurso do CPS, por exemplo.
- 3.3. **Para cada grupo de micro-necessidades, escolher um título de macro-necessidade** – que faça referência a todas as micro-necessidades e as englobe.
- 3.4. **Rever e refinar o processo** – há mais do que uma forma correta.

### 4. AVALIAÇÃO – avaliar o nível de imprescindibilidade de cada necessidade.

O objetivo deste último passo da Etapa 3 é chegar a uma lista de necessidades ordenadas consoante a imprescindibilidade para a empresa e conseqüente prioridade de CPSDD, de forma a guiar os primeiros passos da elaboração de especificações alvo (Etapa 4) e da geração de conceitos (Etapa 5). Isto porque pode ser inviável para a organização investir no desenvolvimento de todas as necessidades.

#### 4.1. Avaliar necessidades segundo uma escala

Pode-se recorrer, por exemplo, a esta escala de 1 a 5:

**Nota 5:** O recurso é imprescindível à empresa e de prioridade máxima no CPSDD.

**Nota 4:** O recurso é necessário à empresa e de prioridade elevada no CPSDD.

**Nota 3:** O recurso é necessário à empresa e de prioridade média no CPSDD.

**Nota 2:** O recurso é útil à empresa e de prioridade média no CPSDD.

**Nota 1:** O recurso é desejável à empresa e de prioridade baixa no CPSDD.

4.2. **Considerar as dependências entre necessidades** – por exemplo, se existisse a necessidade de disponibilização da informação X, poderia ser necessário o recurso de registo ou de captação de dados e tratamento dos mesmos. Caso existam dependências, as avaliações têm de ser coerentes.

4.3. **Identificar quick-wins** – recursos cuja dificuldade de desenvolvimento é reduzida, e nível de investimento não é elevado. Esta identificação é útil para não descartar os benefícios de recursos que tenham recebido notas 3 ou 4, e que não são prioridade máxima, mas que podem trazer benefício imediato.

## ETAPA 4 – ELABORAÇÃO DE ESPECIFICAÇÕES ALVO

As especificações alvo são as metas da equipa de desenvolvimento. São elaboradas através de um conjunto de métricas que descreve um CPS que a equipa de desenvolvimento acredita satisfazer as necessidades produtivas e operativas da organização em causa.

As especificações que resultarem desta etapa serão mais tarde refinadas, chegando-se a um conjunto de especificações finais, que têm base nas limitações dos conceitos que entretanto forem desenvolvidos e selecionados no entretanto.

Por agora, devem ser seguidos os seguintes passos:

### 1. LISTAGEM DE MÉTRICAS – preparar uma lista de métricas.

As métricas mais úteis são aquelas que refletem o mais diretamente possível o grau em que o CPS satisfaz as necessidades. No CPSDD, uma métrica é uma dimensão de satisfação da necessidade em causa. Mantém-se o termo “métrica” para fazer jus ao PDD (ver explicação na página 64).

Os passos a seguir são:

#### 1.1. Contemplar uma necessidade de cada vez

1.2. **Identificar as características** do CPS que refletem o grau em que o CPS satisfaz essa necessidade.

#### 1.3. Elaborar uma métrica de cada vez

1.4. **Preparar uma lista de métricas** – como a do exemplo da Tabela 4.9. Esta lista deve ser elaborada ao mesmo tempo que a matriz de necessidades-métricas (ver 1.5)

Na elaboração das métricas deve-se seguir as seguintes recomendações:

- **As métricas devem ser completas** – idealmente uma necessidade corresponderia a uma métrica, mas pode acontecer que sejam necessárias várias métricas para refletir completamente uma única necessidade.
- **As métricas devem ser práticas e funcionais** – idealmente, as métricas serão propriedades do CPS diretamente observáveis ou analisáveis que podem ser facilmente avaliadas pela equipa.

1.5. **Elaborar uma matriz de necessidades-métricas** – ver exemplo na Tabela 4.8.

### 2. ESTABELECEM NÍVEIS DE SATISFAÇÃO DAS NECESSIDADES

Neste segundo passo, o objetivo é sintetizar as informações disponíveis para realmente definir os níveis de satisfação das necessidades, mínimos e desejados.

- 2.1. **Rever e considerar *outputs* anteriores**, nomeadamente os registos da interpretação de necessidades e a organização hierárquica das mesmas.
  - 2.2. **Consultar a empresa em causa**, para chegar a especificações alvo realmente ajustadas à realidade da empresa e do seu BM.
  - 2.3. **Definir dois tipos de “valores” ou níveis** – estas duas metas serão muito úteis para orientar as etapas subseqüente de desenvolvimento de conceitos, e para refinar as especificações depois da seleção do conceito de CPS.
    - 2.3.1. **Nível mínimo requerido** – abaixo do qual a necessidade deixa de ser razoavelmente satisfeita.
    - 2.3.2. **Nível ideal** – segundo o qual a necessidade é completamente satisfeita.
  - 2.4. **Elaborar tabela** – de correspondência entre as métricas, as necessidades associadas, e os dois níveis referidos acima.
- Estes passos devem ser elaborados iterativamente e em equipa. O objetivo é obter uma tabela onde não falte especificações fulcrais, que refletem as características que ditam o sucesso do CPS.

## ETAPA 5 – GERAÇÃO DE CONCEITOS

### 1. CLARIFICAÇÃO DO PROBLEMA

O objetivo é desenvolver um entendimento geral e dividir o problema em subproblemas (se necessário):

- 1.1. **Reunir e rever inputs** – a declaração de missão do projeto, a lista e a matriz de necessidades e a lista de especificações preliminares são os inputs ideais para o processo de geração de conceitos, embora estas informações devam ser refinadas no decorrer desta etapa.
- 1.2. **Decompor problemas** – decompor um problema complexo em subproblemas mais simples, já que muitos problemas e desafios do design são demasiado complexos para serem resolvidos como um só problema.

Existem vários métodos de decomposição de problemas:

1.2.1. **Decomposição funcional** – podem ser seguidos os seguintes passos:

- **Representar o problema como uma única função** que opera com fluxos de material, energia e fluxos de sinais de controlo e *feedback*.
- **Dividir a função geral em subfunções** para criar uma descrição mais específica do que os elementos do CPS poderão fazer para implementar a função geral do produto.
- **Dividir as subfunções** em subfunções ainda mais simples.
- **Repetir o processo de divisão** – até que cada subfunção seja simples o suficiente para se avançar com a mesma.
- **Não implicar para já princípios tecnológicos específicos.**
- **Criar vários esboços** – não existe uma só solução correta; devem ser desenvolvidas várias alternativas.
- **Começar por seguir um dos fluxos e determinar que operações são necessárias.**
- **Seguir os restantes fluxos e determinar que operações são necessárias** – os detalhes podem ser derivados da reflexão sobre as ligações existentes com o(s) fluxo(s) já estabelecidos.
- **Juntar as várias alternativas num só diagrama.**

1.2.2. **Decomposição por sequência de ações do utilizador** – abordagem geralmente útil para produtos com funções técnicas muito simples que envolvem muita interação do usuário.

1.2.3. **Decomposição por necessidades do utilizador** – abordagem geralmente útil para produtos nos quais a forma, e não os princípios ou a tecnologia, é o principal problema.

1.3. **Aplicar esforços iniciais nos subproblemas críticos** – depois de estar concluída a decomposição deve-se escolher os subproblemas que serão mais críticos para o sucesso do produto e que são mais prováveis de beneficiar de soluções criativas e inovadoras; discutir com a equipa as prioridades.

### 2. PESQUISA EXTERNA – procurar em fontes externas

A capacidade da realização de pesquisas externas é um ativo pessoal e organizacional valioso. O objetivo é encontrar soluções existentes para o problema geral e subproblemas. Para um processo célere deve-se seguir as seguintes medidas de ação:

2.1. **Considerar as seguintes nuances:**

- 2.1.1. **Implementação de uma solução existente** – geralmente é mais rápida e barata que o desenvolvimento de uma nova solução.
  - 2.1.2. **Foco nos subproblemas críticos sem solução anterior satisfatória** – é permitido a partir do momento em que se economiza tempo por usar soluções existentes.
  - 2.1.3. **Combinação de soluções convencionais** – pode gerar novas soluções inovadoras com design geral superior.
- 2.2. **Utilizar a estratégia expandir-focar** – primeiro expandir o escopo da pesquisa, reunindo amplamente informações que possam estar relacionadas ao problema e, em seguida, focar o escopo da pesquisa, explorando as direções promissoras mais detalhadamente. Excesso em ambas as abordagens tornará a pesquisa externa ineficiente.

2.3. **Recolher informação através das seguintes formas:**

- 2.3.1. **Entrevistar utilizadores principais** – à semelhança do que foi feito na etapa de identificação de necessidades, entrevistar engenheiros/operadores/logísticos mais experientes, de outras empresas, fábricas. Pode não ser a forma melhor uma vez que a concorrência pode não querer partilhar informação competitiva.
- 2.3.2. **Consultar especialistas** – profissionais de empresas que detêm soluções de CPS, consultores profissionais de indústria, representantes técnicos de fornecedores.
- 2.3.3. **Investigar a literatura publicada** – jornais, documentos de conferências, revistas comerciais de indústria, relatórios de governo, informação e novos anúncios sobre o paradigma industrial, utilizadores de meios fabris e CPS.
- 2.3.4. **Elaborar um *Benchmarking* de componentes e funcionalidades de CPS** – no contexto de geração de conceitos, o *benchmarking* é o estudo dos componentes e funcionalidades CPS existentes com funcionalidades similares às do produto sob desenvolvimento ou relacionadas com possíveis soluções para os subproblemas que a equipa está a resolver; o *benchmarking* pode revelar conceitos existentes que já foram implementados com sucesso para resolver um problema específico.

### 3. PESQUISA INTERNA – procurar em fontes internas

Uso do conhecimento e criatividade pessoal e em equipa para gerar conceitos de solução (*brainstorming*);

Considerar as seguintes nuances:

- **“Fontes internas”** porque todas as ideias que surgem desta atividade são criadas a partir de conhecimentos já em posse da equipa.
- **Criatividade e abertura máximas** – esta atividade deve ser a mais aberta e criativa de todas as tarefas no desenvolvimento de produtos.
- **Processo de recuperar uma informação potencialmente útil** da memória e depois adaptá-la ao problema em questão.
- **Pessoalmente isolado ou pessoalmente em equipa** – esta atividade pode ser realizada por indivíduos que trabalham isolados ou por um grupo de pessoas que trabalham juntas.

### 4. GERAÇÃO DE CONCEITOS

A quarta atividade tem como objetivo a navegação no espaço de possibilidades por organizar e sintetizar estes fragmentos. Utilizar os seguintes métodos:

#### 4.1. Árvore de classificação de conceitos

É usada para dividir todo o espaço de soluções possíveis em várias classes distintas, o que irá facilitar a comparação e a eliminação de conceitos (“poda”).

Esta árvore permite:

- **Podar as ramificações menos promissoras** – identificar abordagens de soluções que parecem não ter muito mérito; esta atividade requer avaliação e juízo, pelo que deve ser feita cautelosamente.
- **Identificar abordagens independentes** para o problema.
- **Identificar abordagens diferentes** – cada ramo da árvore pode ser considerado uma abordagem diferente para resolver o problema geral.
- **Identificar abordagens independentes** – algumas dessas abordagens podem ser quase completamente independentes uma da outra.
- **Realçar e identificar abordagens não desenvolvidas o suficiente** em cada ramificação.
- **Refinar a decomposição dos problemas e subproblemas para ramificações particulares.**

#### 4.2. Elaborar matriz de geração de conceitos

Ver exemplo na Tabela 4.10.

**4.2.1. Popular necessidades finais** (resultantes da Etapa 3) nas linhas da matriz.

**4.2.2. Popular respetivas métricas**, com base na correspondência estipulada na matriz de correspondência entre necessidades e métricas (Tabela 4.8).

**4.2.3. Criar colunas de conceitos, A, B, C ...** tantos quanto sejam necessários para se obter uma geração de conceitos suficientemente completa para que não se descartem soluções importantes. Sugere-se que no mínimo se elaborem 3 conceitos, um simples, um médio, e um complexo (ver explicação no subcapítulo 4.3.5).

**4.2.4. Popular níveis de satisfação** – para cada necessidade e para cada métrica, tendo referência nos níveis estabelecidos no último passo da Etapa 4 na tabela de níveis estabelecidos para as métricas (Tabela 4.9), a tarefa agora é preencher cada célula com os seguintes valores:

- “-” para o nível mínimo requerido;
- “+” para o nível ideal de satisfação;
- “+/-” para os casos onde o nível pretendido não precisa de ser o ideal, mas também se acredita existir capacidade de desenvolver um CPS com capacidade superior ao nível mínimo.

Esta geração de conceitos deve ser realizada simultaneamente à elaboração da arquitetura de CPS inerente ao conceito que está a ser gerado (ver Etapa 10).

## ETAPA 10 – DEFINIÇÃO CONCEPTUAL DA ARQUITETURA DE CPS

### 1. ALOCAR RECURSOS – organizar e alocar recursos de CPS necessários

Ver exemplo de *output* para este passo na Figura E – 1.

- 1.1. **Reunir os diferentes recursos de CPS** – juntar de forma visual os diferentes recursos, a fim de visualizar e compreender melhor o todo do CPS, ainda que sem organização lógica das suas partes.
- 1.2. **Organizar recursos nas secções das implantações onde são necessários** – baseando esta alocação na informação patente nos diferentes *outputs* recolhidos até agora, nomeadamente a declaração de missão, a interpretação e hierarquização de necessidades, etc. onde está registado quais os locais onde os recursos são necessitados (ou quais os HC e onde estes se operam).
  - 1.2.1. **Duplicar recursos se necessário** – nos casos em que o recurso diz respeito a duas secções distintas.
  - 1.2.2. **Criar grupos de recursos gerais** – que se aplicam a múltiplas secções, ou mesmo a todas elas.
- 1.3. **Reunir o detalhe de cada recurso** – listar todo o detalhe existente de cada recurso:
  - Especificações alvo elaboradas no Passo 2 da Etapa 4 (níveis de satisfação alvo, ver exemplo na Tabela 4.9).
  - Detalhe das necessidades (tabelas de interpretação e hierarquização, Etapa 3)

### 2. IDENTIFICAÇÃO DE COMPONENTES E FUNCIONALIDADES

Ver exemplo de *output* para este passo na Tabela E – 4.

- 2.1.1. **Tabela de componentes e funcionalidades** – para cada secção de recursos, identificar para cada nível C quais os conceitos da Figura 2.6 necessários para cada conceito de CPS gerado na Etapa 5 (na matriz de geração de conceitos (A, B, C ... – Tabela 4.10).

Este passo deve ser realizado em simultâneo ao Passo 3. À medida que se forem identificando elementos, estes devem ir sendo mapeados na respetiva secção, de forma a ir elaborando a esquematização. Ver diretrizes do passo seguinte para guiar a elaboração desta tabela.

### 3. ESQUEMATIZAÇÃO DE COMPONENTES E FUNCIONALIDADES

Ver exemplo de *output* para este passo na Figura 4.12.

Este passo deve ser realizado simultaneamente à elaboração da tabela do subpasso 2.1.1.

- 3.1. **Arquitetura conceptual de CPS** – elaborar esquema que mapeia os diferentes componentes e funcionalidades, nos diferentes níveis da arquitetura, organizados por secções das implantações ou exteriores às mesmas. Devem ser seguidas as seguintes diretrizes:
  - 3.1.1. **Componentes e funcionalidades locais**
    - **Nível de contexto** – desenhar uma camada que refira qual a secção da implementação onde se localizam os componentes e funcionalidades locais, assim como os principais contextos de ação para contextualizar a informação colocada nos níveis acima no bloco. Incluir ícones de HC (colaboradores no contexto).
    - **Conexão (I)** – identificar quais os componentes e funcionalidades necessários às capacidades de conexão localizados na secção; incluir especificação de dados a registar no local e dados a consultar no local.
    - **Conversão (II)** – caso a conversão de dados se efetuar em componentes locais, identificar quais os componentes e funcionalidades.
    - **Ciber (III)** – caso os componentes e funcionalidades do nível ciber residirem (ou forem exclusivos) na secção em causa, identificar quais os componentes e funcionalidades.
    - **Cognição (IV)** – caso os componentes e funcionalidades do nível de cognição residirem (ou forem exclusivos) na secção em causa, identificar quais os componentes e funcionalidades.
    - **Configuração (V)** – caso os componentes e funcionalidades do nível de configuração residirem (ou forem exclusivos) na secção em causa, identificar quais os componentes e funcionalidades.
    - **Coalizão, Conteúdo e Cliente (VI, VII, VIII)** – caso a conversão de dados se efetuar em componentes locais, identificar quais os componentes e funcionalidades.
  - 3.1.2. **Componentes e funcionalidades globais**

Muitos dos componentes e funcionalidades destas camadas são comuns a todos os contextos identificados. Deve-se, por isso:

    - **Desenhar estes níveis no centro do esquema.** Por exemplo, podem existir várias camadas Ciber comuns a duas ou mais secções: a camada comum Ciber (i) tem componentes em comum nas secções 1, 2 e 3, e a camada comum Ciber (ii) tem componentes em comum com as secções 4, 5 e 6.
    - **Identificar componentes e funcionalidades** – para cada uma dessas camadas, quais os componentes e funcionalidades comuns a mais do que uma secção.
    - **Fazer referência**, na respetiva camada local, à camada comum.
    - **Alocar as camadas comuns a secções das implantações** – por exemplo, uma camada comum de Conversão (II) necessita de um centro local onde processar os dados.

### 4. ESQUEMATIZAÇÃO DE LIGAÇÕES E INTERAÇÕES, FIXAS E MÓVEIS

- 4.1. **Fluxos de dados e informação** – esquematizar as transferências de dados.
- 4.2. **Fluxos de materiais** – para ilustrar lógica de componentes e funcionalidades de operações de transporte, por exemplo.
- 4.3. **Esquematização através de ícones** – a fim de complementar com mais informação que ajude a não esquecer aspetos de projeto de CPSDD, como aqueles relacionados com a lógica de comunicações sem-fios, ou atividades relacionadas com as secções em causa, como o fornecimento, os transportes internos ou as aplicações em redes externas.

Em todos os passos desta etapa, é de realçar a importância de confirmar que não se perde informação importante das necessidades, e que não se incluem componentes e funcionalidades que não foram avaliadas como imprescindíveis (score 5). Nesse sentido, é aconselhável a consulta a par e passo da informação obtida na interpretação, organização e avaliação de necessidades (Exemplos na Tabela E – 1 e na Tabela E – 2).

## D. DESCRIÇÃO DAS ETAPAS DA VC DA FAMÍLIA DE PRODUTOS DA EMPRESA A (CAPÍTULO 4)

Descrições das etapas antes do início do projeto de CPSDD. Baseadas em parte no trabalho de Machado [82]. Apenas se incluiu informação relevante para o CPSDD relativo às oportunidades de desenvolvimento A a E, apresentadas na Figura 4.7. As fotografias foram também retiradas do trabalho do colega.

### 1. Entrada de encomendas – registo de pedidos, verificação de inventário, pagamentos, faturações e registo de encomendas.

Após a entrada de um pedido de artigos standard por parte do cliente, o Responsável da loja (Colab1) anota por escrito num formulário os detalhes do pedido. Caso o pedido não possa ser satisfeito de imediato, por não haver em stock e/ou por incluir produtos personalizados, o Colab1 regista os detalhes da encomenda num formulário em papel e avisa o Controlador de produção (Colab2), que surgiu uma nova encomenda e que este deve vir buscar o novo formulário com os detalhes. Após ter em mão uma encomenda ou um conjunto de ordens de encomenda, o Colab2 analisa manualmente os detalhes, como as quantidades e perfis dos artigos encomendados, e faz um planeamento simples da produção.

O Responsável pelo Armazém (Colab3), preenche uma ficha manuscrita sobre os artigos standard disponíveis. Após a entrada no armazém de artigos prontos para entrega, ou da saída destes após uma venda, o Colab3 regista manualmente a informação. Os colaboradores Colab1 e Colab2 solicitam verbalmente a informação se existe ou não stock disponível para venda imediata e se o tamanho e peso da encomenda requerem o serviço de transporte.

### 2. Fornecimento de m-p – fornecimento e verificação de m-p; alimentação no processo de corte

Após concluído o planeamento, o Colab2 consulta verbalmente o Colab3 que o informa se existe a m-p necessária para a produção em causa. Para o efeito, o Colab3 verifica visualmente se existem troncos de madeira suficientes. Caso não existam, o Colab2 contacta por chamada telefónica a unidade de abate de pinhais, requisitando o fornecimento da quantidade de m-p necessária.

A receção e posterior verificação da m-p são as primeiras operações do ciclo produtivo, realizadas no início da linha de corte, com vista à deteção e remoção de corpos estranhos que possam danificar a maquinaria da linha de corte, como é o caso dos pregos. Esta atividade é executada por um operador que primeiramente analisa, em lotes de quinze troncos, com um detetor de metais cada tronco e, caso haja algum material metálico estranho, procede à sua extração. Posteriormente, procede-se à alimentação da m-p para a linha de corte com um empilhador, transportando-se três toras de cada vez.



### 3. Processo de corte – remoção da casca, corte em largura, corte em comprimento, corte em espessura.

O processo de corte consiste em quatro subprocessos, distribuídos ao longo de uma linha de corte onde operam quatro máquinas (M):

#### 3.1. Remoção da casca

Este sector é constituído por uma descascadeira (M1), cuja função é retirar a casca de pinheiro das toras com dimensão superior a 24 centímetros de diâmetro, para não danificar as serras de corte das restantes máquinas. Este processo é executado autonomamente. Posteriormente, são transportadas por tapetes rolantes, automaticamente até ao seguinte processo, suportando, no máximo, cerca de vinte troncos. Nesta operação, a casca de pinheiro é aproveitada como subproduto, utilizado para venda, e introduzido no mercado como combustível para caldeiras industriais ou em jardinagem e decoração.



#### 3.2. Corte em largura

Este sector é constituído pelo *charriot* (M2), máquina responsável pela definição da largura desejada de cada peça. É operado pelo operador que comanda todo o processo de entrada de cada tora, posiciona-a manualmente de maneira a executar mais eficientemente os diversos cortes e escolher, por fim, o destino de cada peça na linha de corte. O tronco é normalmente dividido em quatro peças. As laterais, chamadas de costaneiros, vão, posteriormente, para a linha de aproveitamento, enquanto as duas peças interiores, com a largura desejada, continuam na linha de corte. Cada tora é dividida em duas peças com as larguras desejadas. A M2 requer um *setup* para trocar a serra de fita todos os dias, ação que é realizada sempre após a hora de almoço.



Esta é uma medida de segurança, ou seja, troca-se a serra de fita todos os dias sem ter a certeza se esta está fora do tempo de vida. Para além desta paragem planeada, o processo é caracterizado por outras paragens esporádicas não-planeadas, devido ao sistema de alimentação de m-p ineficiente, o que provoca a saída dos troncos do seu caminho natural, bloqueando, deste modo, a sua passagem. Entre a M2 e a retestadeira (M3), o transporte é executado através de tapetes rolantes automáticos. No entanto, três operadores encontram-se nesta zona, sendo um responsável por selecionar o costaneiro, de acordo com as suas medidas, e posicionar as peças da melhor maneira, para seguir o seu caminho. Os outros dois operadores, em zonas diferentes, são os responsáveis por transferir as peças de um tapete rolante para outro.



#### 3.3. Corte em comprimento

A retestadeira (M3) tem como objetivo definir, com exatidão, o comprimento das peças. É constituída por três discos que cortam cada produto do *charriot* M2 em duas peças, com o comprimento exato. É dotada de um sistema hidráulico que segura as peças, para a obtenção de um corte com precisão. Quando é necessário mudar de comprimento, é necessário o *setup* de reposicionar os discos, que é feito manualmente através de uma medição tradicional. As duas peças são empurradas pela peça seguinte, que entram na M3, de modo a chegar à entrada da multi-serra (M4), onde um operador posiciona as peças manualmente.

### 3.4. Corte em espessura

A multi-serra (M4) é uma máquina constituída por vários discos de corte, sendo cada produto da M3 introduzido e dividido, dependendo, no entanto, da espessura da peça desejada, em sete partes. A separação e alocação das peças finais é realizada por três operadores. Dos três operadores, um está encarregue da separação das peças não conformes para a linha de aproveitamento; e outros dois responsáveis, pela formação de dois malotes de cada vez, com 350 peças cada, em média. A alteração da espessura no produto final, ou o próprio desgaste dos discos, provoca uma paragem de *setup*. Nesta secção da VC, a única atividade de valor acrescentado é o processo de corte, ou seja, apenas 3% do tempo total desta secção, sendo 2% utilizado em transporte e os restantes 95% em inventário. Para além disso, constata-se que a M4 é a que tem o maior tempo de *setup* de todo o processo de corte e a que se realiza mais vezes para se adaptar aos mais diferentes produtos, sendo necessário otimizar este, de modo a diminuir o *downtime* de toda a linha de corte.



**Nota geral:** Nas etapas 2 e 3 da VC verifica-se que apenas 20% do tempo de produção corresponde a atividades de valor acrescentado, 21% a transporte e os restantes 59% despendidos em inventário, na constituição dos malotes. Registe-se que a alta percentagem de tempo em inventário deve-se ao *pack size* dos malotes que é estabelecido de acordo com a normas de empilhamento da madeira serrada. A percentagem de tempo de valor não acrescentado, absorvida em transporte, deve-se ao *layout* não otimizado para a linha de corte, observando-se, por conseguinte, espaço entre os processos, e respetivo transporte.

Verifica-se também paragens entre sectores para comunicar mudanças na produção e, certas vezes, mau entendimento entre as mesmas, o que provocou erros na produção do produto desejado. Para além disso, averiguou-se que acontecia o malote já estar constituído, e havia períodos de espera até o operador do empilhador o vir buscar, para ser transportado para o tratamento químico, o que manifesta falta de comunicação entre sector e operador.

## 4. Processo de Tratamento – tratamento químico e tratamento fitossanitário

### 4.1. Tratamento químico

Concluído o processo de corte e constituído o malote, este é transportado para junto da zona do tratamento químico, onde fica em espera por razões de logística. Posteriormente, é levado para o tratamento químico em lotes de três malotes. Para tal, são colocados num elevador, que os desce e submerge num tanque com um composto químico, com o intuito de proteger a madeira contra os agentes deterioradores, como é o caso dos fungos e dos insetos. Este tratamento por imersão é realizado automaticamente. Saliente-se que este processo consiste em manter os malotes submersos, durante o tempo recomendado, dependendo do tipo de madeira e da sua utilização. Finalizado o período de tratamento, o elevador sobe, para deixar escorrer o excesso da solução durante um tempo recomendado.



Contudo, não existe nenhum tipo de indicação de quando é que o malote está pronto para ser retirado, verificando-se, que os mesmos ficam à espera tempo adicional para serem retirados do elevador e serem transportados.

Nesta secção do fluxo de valor verifica-se que em apenas 97% do tempo o produto está em inventário, sendo 1% utilizado em transporte, 1% em espera e somente 1% em valor acrescentado. O principal desperdício, nesta secção, ocorre devido ao sistema de produção implementado entre processos isolados, uma vez que assenta no conceito de produção empurrada, o que se reflete o transporte interrompido com acumulação de inventário entre sectores.

### 4.2. Tratamento fitossanitário

Após a conclusão do tratamento químico, os malotes são transportados para a zona do tratamento fitossanitário. Aí permanecem em stock durante um período, devido à política empresarial de se realizar o tratamento apenas no final do dia, a fim de se conseguir responder aos pedidos urgentes de clientes que passam à frente do plano de produção. Normalmente, é executado o exercício de descarga e de carga da câmara fitossanitária somente no final do dia. Informe-se que a descarga é efetuada às 15 horas e a posterior carga às 16 horas, dando-se início ao tratamento às 17 horas.



Depois é efetuado o carregamento completo na câmara com os malotes e a sua preparação técnica, de acordo com a DGAV (Direção Geral da Alimentação e Veterinária), bem como a colocação das sondas para monitorização e registo das temperaturas, sem esquecer a aplicação das regras de carregamento e empilhamento, de modo a garantir uma circulação do ar e a distribuição homogênea do calor.

Constata-se que o tratamento fitossanitário por choque térmico tem como objetivo evitar a dispersão do nemátodo da madeira do pinheiro. Com efeito, a madeira é utilizada na fabricação de embalagens para mercadorias, no trânsito internacional, e necessita, obrigatoriamente, deste tratamento, conforme a ISPM15 (norma internacional para medidas fitossanitárias). O tratamento de madeira em malotes é considerado válido, quando todas as leituras se mantiverem iguais ou superiores à temperatura pretendida, ou seja, 63°C, durante 1 hora, pelo que um tratamento fitossanitário demora, em média, 8 horas.

Verifica-se que, nesta secção da VC, 20% do tempo é de valor acrescentado, sendo a percentagem de valor não acrescentado distribuída por 5%, em transporte, e 75%, em inventário. A elevada percentagem de tempo de valor não acrescentado nesta secção da VC deve-se, essencialmente, ao sistema de produção implementado sem fluxo, já que interrompe o fluxo de transporte, originando a acumulação de inventário entre processos. Para além disso, não existe um planeamento prévio da quantidade de malotes a colocar na câmara fitossanitária, sendo que nem todos os malotes que passam no processo de corte e no tratamento químico, realizam logo o tratamento fitossanitário.

## 5. Armazenamento e entregas

Finalizado o procedimento anterior, uma parte dos malotes são transportados pelo operador do empilhador até o parque de entregas. A restante parte dos malotes destinados para ficar em stock de segurança e de exposição em loja, são transportados por um operador para o armazém de exposição e logística. O C3 regista as entradas e saídas de artigos. O transporte de encomendas é operacionalizado pelo C1.

### Análise geral das etapas

Ao analisar todas as etapas e setores, verifica-se que não há comunicação entre os diversos processos e o fluxo de material, o que demonstra uma produção caracteristicamente empurrada. Disto resulta a acumulação de inventário entre sectores e na duplicação de processos nos transportes, pelo que se observa a existência constante de dois carregamentos e de duas descargas da m-p, para chegar ao sector a jusante

## E. OUTPUTS DO CASO DE ESTUDO (CAPÍTULO 4)

### ETAPA 3 – IDENTIFICAÇÃO DE NECESSIDADES

Tabela E – 1. Interpretação de necessidades de CPS (E3 – P2).

e	DECLARAÇÃO DA EMPRESA A	NECESSIDADES DE CPS INTERPRETADAS
e1 - ENTRADA DE ENCOMENDAS	Os colaboradores de controlo de produção necessitam do conhecimento de informação sempre que necessário sobre todos os detalhes de cada venda imediata em loja, venda por encomenda e do inventário disponível em armazém. Necessitam também de analisar de forma inteligente os dados das encomendas para planear devidamente o fornecimento de matéria prima (e2), o processo de transformação da mesma (e2,3,4), o armazenamento e entregas (e5).	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. O CPS disponibiliza informação, sempre que necessário, relativa aos pedidos de artigos.</li> <li>2. O CPS proporciona a capacidade de análise inteligente aos dados de encomendas.</li> <li>3. O CPS proporciona a capacidade de planeamento das operações e da produção.</li> </ol>
	Para possibilitar o ponto anterior, os colaboradores na receção necessitam de registar a informação relativa aos pedidos para compra, que lhes é passada verbalmente, na loja ou por telefone. É necessária uma forma de registo ágil e padronizado dos detalhes de cada pedido, venda, pagamento e faturação. Quando recebem um pedido manualmente ou verbalmente, necessitam de saber se os artigos de madeira pedidos estão disponíveis em inventário e prontos para venda imediata. Necessitam também de obter informação para averiguar se é preciso serviço de transporte (dimensões e peso totais da encomenda)	<ol style="list-style-type: none"> <li>4. O CPS possibilita o registo ágil e padronizado de pedidos na loja.</li> <li>5. O CPS facilita a averiguação se o pedido pode ou não ser satisfeito de imediato.</li> <li>6. O CPS disponibiliza informação, sempre que necessário, relativa ao inventário de artigos finalizados e prontos para venda, disponíveis em armazém.</li> <li>7. O CPS facilita a averiguação se é necessário o serviço de transporte.</li> </ol>
	É necessário que o responsável do armazém registe as entradas e saídas no armazém de artigos de madeira prontos para venda. Para o efeito, é necessária uma forma de registo de informação do inventário disponível: que artigos, em que quantidade, onde se encontram no armazém, data de finalização da transformação de madeira e datas de entrada e saída do armazém.	<ol style="list-style-type: none"> <li>8. O CPS possibilita o registo de informação relativa às entradas e saídas de artigos prontos para venda no armazém.</li> </ol>
	Além da forma presencial na loja e por telefone, é necessária uma forma padronizada, intuitiva, acessível e autónoma de os clientes poderem efetuar encomendas, sem que seja necessária a intervenção de um colaborador. É também necessário facilitar a encomenda de artigos personalizados.	<ol style="list-style-type: none"> <li>9. O CPS possibilita uma forma padronizada, intuitiva, acessível e autónoma de efetuar encomendas.</li> <li>10. O CPS possibilita a elaboração de encomendas de produtos personalizados.</li> </ol>
e2 – FORNECIMENTO DE M-P	O controlo de produção necessita de: prever a procura no mês seguinte e planear um fornecimento de m-p mais económico.  Necessita também de ter o conhecimento em tempo real da m-p disponível no parque de m-p e de fazer análises à qualidade da m-p recebida regularmente para avaliar a qualidade dos fornecedores.	<ol style="list-style-type: none"> <li>11. O CPS proporciona a capacidade de previsão da procura no mês seguinte.</li> <li>12. O CPS proporciona a capacidade de planeamento do fornecimento de m-p.</li> <li>13. O CPS disponibiliza, sempre que necessário, informação da m-p disponível no parque de m-p.</li> <li>14. O CPS proporciona a capacidade de análise à qualidade de m-p.</li> <li>15. O CPS proporciona a capacidade de avaliação de fornecedores.</li> </ol>
	O colaborador responsável pela verificação de m-p necessita de uma forma que lhe permita registar facilmente a informação necessária para possibilitar a declaração anterior. Essa informação inclui a quantidade de troncos que entram e saem do parque, o respetivo tipo de madeira, comprimento e diâmetros máximos e mínimos de cada tronco, e as ocorrências de problemas (metais detetados, defeitos).	<ol style="list-style-type: none"> <li>16. O CPS facilita o registo da informação relativa à m-p que entra e sai do parque de m-p.</li> </ol>
	É necessário criar formas de comunicação eficientes entre o controlo de produção e o parque de m-p, e entre o controlo de produção e os fornecedores de m-p.	<ol style="list-style-type: none"> <li>17. O CPS suporta formas de comunicação eficientes entre o controlo de produção e o parque de m-p., e entre o controlo de produção e os fornecedores de m-p.</li> </ol>
e3 – PROC. CORTE	O controlo de produção necessita de conhecer em tempo real o tempo de funcionamento e o down-time dos processos de corte e de todas as máquinas. Ao longo de toda a linha de corte, é necessário que haja um registo fácil e assíduo de ocorrências, por parte do colaborador de supervisão da produção. Ocorrências incluem paragens esporádicas não planeadas e avarias. É necessário registar a causa da ocorrência, a frequência, os operadores envolvidos, em que máquina/dispositivo e local aconteceu.	<ol style="list-style-type: none"> <li>18. O CPS disponibiliza, ao controlo de produção, informação sobre o tempo de funcionamento e o down-time de máquinas.</li> <li>19. O CPS possibilita o registo fácil e assíduo de informação relativa a ocorrências por parte da supervisão de produção.</li> </ol>
	O controlo e a supervisão de produção necessitam de uma capacidade de identificação inteligente de problemas.	<ol style="list-style-type: none"> <li>20. O CPS possibilita uma identificação de problemas inteligente.</li> </ol>

e	DECLARAÇÃO DA EMPRESA A	NECESSIDADES DE CPS INTERPRETADAS
e3 – PROCESSO DE CORTE	<p>É necessária uma forma de comunicação eficiente entre todos os participantes nesta etapa para evitar maus entendimentos, erros na produção e consequente desperdício de materiais e tempo. O controlo de produção precisa de comunicar o mais eficaz e rapidamente possível aos operadores as mudanças na produção para que estes operem a configuração certa das máquinas o quanto antes. Os operadores dos diferentes subprocessos de corte necessitam de comunicar de uma forma eficiente entre si. Após a finalização do corte e da constituição dos malotes, é necessária uma comunicação eficiente com o operador do empilhador, para evitar o tempo de espera de o malote ser levado para a e4.</p>	<p>21. O CPS suporta a comunicação eficiente entre todos os participantes do processo de corte, e destes com o empilhador.</p> <p>22. O CPS facilita a comunicação de mudanças na produção e novas configurações das máquinas.</p>
	<p>É necessária uma forma de detetar e alertar automaticamente os operadores das irregularidades da alimentação de m-p na entrada de cada subprocesso. É necessário que a supervisão de produção obtenha informação das quantidades de inventário acumulado entre subprocessos de corte. Para isso é necessário facilitar o registo manual das descargas de inventário à porta dos subprocessos.</p>	<p>23. O CPS deteta irregularidades na alimentação de m-p na entrada de cada subprocesso.</p> <p>24. O CPS lança automaticamente o alerta após detetar as irregularidades.</p> <p>25. O CPS disponibiliza informação do stock acumulado.</p> <p>26. O CPS possibilita o registo das descargas de inventário entre subprocessos.</p>
	<p>O controlo de produção e os operadores das máquinas necessitam de uma forma de aceder e calcular automaticamente quais as configurações das máquinas, parâmetros de corte, como a posição das ferramentas em cada máquina, para satisfazer todos os pedidos de artigos standard e os artigos personalizados, para tornar a customização em massa mais eficiente.</p>	<p>27. O CPS calcula automaticamente as configurações de cada máquina.</p> <p>28. O CPS disponibiliza informação das configurações das máquinas do processo de corte aos operadores e controlo de produção.</p>
	<p>Os operadores das máquinas necessitam da supervisão da posição ferramentas e superfícies de corte, de forma a melhorar a precisão do corte, evitar erros e melhorar o setup. A Empresa A tem a necessidade de maximizar o uso das superfícies de corte. Remoção da casca – lâminas de corte da descascadeira (M1); Corte em largura – serras de fita de corte do charriot (M2); Corte em comprimento – discos de corte da retestadeira (M3); Corte em espessura – discos de corte da multi-serra (M4).</p>	<p>29. O CPS permite monitorizar a posição das ferramentas.</p> <p>30. O CPS deteta irregularidades nas superfícies de corte.</p> <p>31. O CPS avisa automaticamente quando se deve trocar a superfície de corte.</p>
e4 – TRATAMENTO	<p>O controlo de produção necessita da capacidade de monitorização do inventário acumulado, para analisar os tempos de espera. Para isso, após a constituição de um malote, o operador responsável pelo transporte dos mesmos até ao local do tratamento químico deve registar a hora e o minuto do momento de descarga do malote do empilhador.</p>	<p>32. O CPS disponibiliza informação do inventário acumulado.</p> <p>33. O CPS possibilita o registo da descarga dos malotes.</p>
	<p>O operador do tratamento químico necessita de uma forma de saber os parâmetros otimizados do processo (tempo de submersão, temperatura do fluido) com base no tipo de madeira e na sua utilização. Necessita também de poder monitorizar a evolução da temperatura do fluido e o tempo do processo, para melhor controlo manual.</p>	<p>34. O CPS disponibiliza os parâmetros otimizados do tratamento químico.</p> <p>35. O CPS permite monitorizar a evolução da temperatura e o tempo do processo de tratamento químico.</p>
	<p>O controlo de produção necessita de uma forma que facilite um melhor planeamento de qual o melhor horário para os tratamentos fitossanitários e qual a quantidade ideal de tratamentos por dia.</p>	<p>36. O CPS facilita o planeamento dos tratamentos fitossanitários.</p>
e5 – FINALIZAR	<p>O operador do tratamento fitossanitário necessita de uma forma de saber os parâmetros otimizados do processo (parâmetros da preparação técnica, tempo de tratamento, temperatura do ar), monitorizar e registar as temperaturas do processo. É também necessária uma forma de certificar a circulação do ar e a distribuição homogénea do calor.</p>	<p>37. O CPS disponibiliza os parâmetros otimizados do tratamento fitossanitário.</p> <p>38. O CPS permite monitorizar a evolução dos parâmetros do tratamento fitossanitário.</p> <p>39. O CPS permite monitorizar a circulação do ar e a distribuição homogénea de calor</p>
	<p>Caso seja necessário o serviço de transporte, o controlo de produção necessita de monitorizar o estado do transporte da encomenda e receber a confirmação de que esta foi entregue com sucesso.</p>	<p>40. O CPS permite monitorizar o transporte de entrega de encomendas.</p>
e5 – FINALIZAR	<p>É necessária uma forma de comunicação mais eficiente entre os responsáveis de armazém, o controlo de produção e os responsáveis pelo transporte.</p>	<p>41. O CPS facilita a comunicação entre os responsáveis de armazém, o controlo de produção e os responsáveis pelo transporte da encomenda até ao cliente.</p>

Nota: Na Tabela E – 1 foram destacadas as necessidades que receberam nota 5 na avaliação de necessidades (Tabela E – 2).



Tabela E – 2. Organização hierárquica de necessidades e avaliação (E3 – P3, P4)

AVALIAÇÃO<sup>19</sup>

#TABELA E – 1	N#	NECESSIDADES DE CPS	1	2	3	4	5	QUICK-WIN?
<b>I. DISPONIBILIZAÇÃO DE INFORMAÇÃO:</b>								
1	1	Demanda de artigos					X	
6	2	Inventário de artigos prontos para venda disponíveis em armazém					X	
13	3	M-p disponível no parque de m-p				X		
18	4	Tempo de funcionamento e o <i>down-time</i> de todas as máquinas			X			
28	5	Configurações das máquinas do processo de corte				X		
25, 32	6	Inventário acumulado entre processos				X		
34	7	Parâmetros otimizados do tratamento químico		X				
37	8	Parâmetros otimizados do tratamento fitossanitário		X				
<b>II. POSSIBILITAÇÃO DO REGISTO MANUAL DE INFORMAÇÃO:</b>								
4	9	Pedidos na loja (e encomendas)					X	
8	10	Entradas e saídas de artigos prontos para venda no armazém					X	
9,10	11	Encomendas, incluindo produtos personalizados					X	
16	12	Entradas e saídas de m-p					X	
19	13	Ocorrências de problemas na produção					X	
26, 33	14	Descarga de inventário				X		
<b>III. SUPORTE E FACILITAÇÃO DA COMUNICAÇÃO:</b>								
17,22,41	15	Entre o controlo de produção e todos os participantes na VC				X		X
21	16	Entre os operadores do processo de corte e transporte entre processos				X		X
41	17	Entre os responsáveis do armazém e o transporte da encomenda ao cliente		X				X
<b>IV. MONITORIZAÇÃO DE:</b>								
29	18	Posição das ferramentas nos processos de corte					X	
35	19	Evolução da temperatura e o tempo do processo de tratamento químico			X			
38	20	Evolução dos parâmetros do tratamento fitossanitário			X			
39	21	Circulação do ar e a distribuição homogénea de calor	X					
40	22	Transporte de entrega de encomendas			X			
<b>V. DETEÇÃO E AVISO DE IRREGULARIDADES:</b>								
23,24	23	Irregularidades na alimentação de m-p na entrada de cada subprocesso					X	
30,31	24	Irregularidades nas superfícies de corte e necessidade de troca das mesmas				X		
<b>VI. ANÁLISE E APOIO À DECISÃO:</b>								
2	25	Análise inteligente aos dados de encomendas				X		
5	26	Averiguação se o pedido pode ou não ser satisfeito de imediato			X			
7	27	Averiguação se é necessário o serviço de transporte.		X				
11	28	Análise e previsão da procura no mês seguinte				X		
14,15	29	Análise à qualidade do fornecimento de matéria-prima	X					
20	30	Análise inteligente aos problemas					X	
<b>VII. FACILITAÇÃO DO PLANEAMENTO:</b>								
3,12	31	Planeamento das operações (fornecimento de m-p e logística)					X	
3,27,36	32	Planeamento da produção (processos de corte e tratamento)					X	

Nota 5: O recurso é imprescindível à empresa e de prioridade máxima no CPSDD.

Nota 4: O recurso é necessário à empresa e de prioridade elevada no CPSDD.

Nota 3: O recurso é necessário à empresa e de prioridade média no CPSDD.

Nota 2: O recurso é útil à empresa e de prioridade média no CPSDD.

Nota 1: O recurso é desejável à empresa e de prioridade baixa no CPSDD.

## ETAPA 4 – ELABORAÇÃO DE ESPECIFICAÇÕES ALVO

Tabela E – 3. Lista de necessidades do CPS 1.1 (E3 e E4).

#	NECESSIDADE	# Tabela E – 2	# TABELA E – 1
1	Disponibilização de informação sobre a demanda de artigos	1	1
2	Disponibilização de informação sobre o inventário de artigos prontos para venda disponíveis em armazém	2	6
3	Possibilitação do registo manual dos pedidos na loja	9	4
4	Possibilitação do registo manual das entradas e saídas de artigos prontos para venda no armazém	10	8
5	Possibilitação do registo manual das encomendas, incluindo produtos personalizados	11	9,10
6	Possibilitação do registo manual das entradas e saídas de m-p	12	16
7	Possibilitação do registo manual das ocorrências de problemas na produção	13	19
8	Suporte e facilitação da comunicação entre o controlo de produção e todos os participantes na VC	15	17, 22, 41
9	Suporte e facilitação da comunicação entre os operadores do processo de corte e transporte entre processos	16	21
10	Monitorização da posição das ferramentas nos processos de corte	18	29
11	Deteção e aviso de irregularidades na alimentação de m-p na entrada de cada subprocesso	23	23, 24
12	Análise inteligente aos problemas	30	20
13	Facilitação do planeamento das operações (fornecimento de m-p e logística)	31	3,12
14	Facilitação do planeamento da produção (processos de corte e tratamento)	32	3, 27, 36

## ETAPA 10 – DEFINIÇÃO CONCEPTUAL DA ARQUITETURA DE CPS

### LAYOUT SIMPLIFICADO DE RECURSOS DE CPS

#### IMPLANTAÇÕES DA EMPRESA A

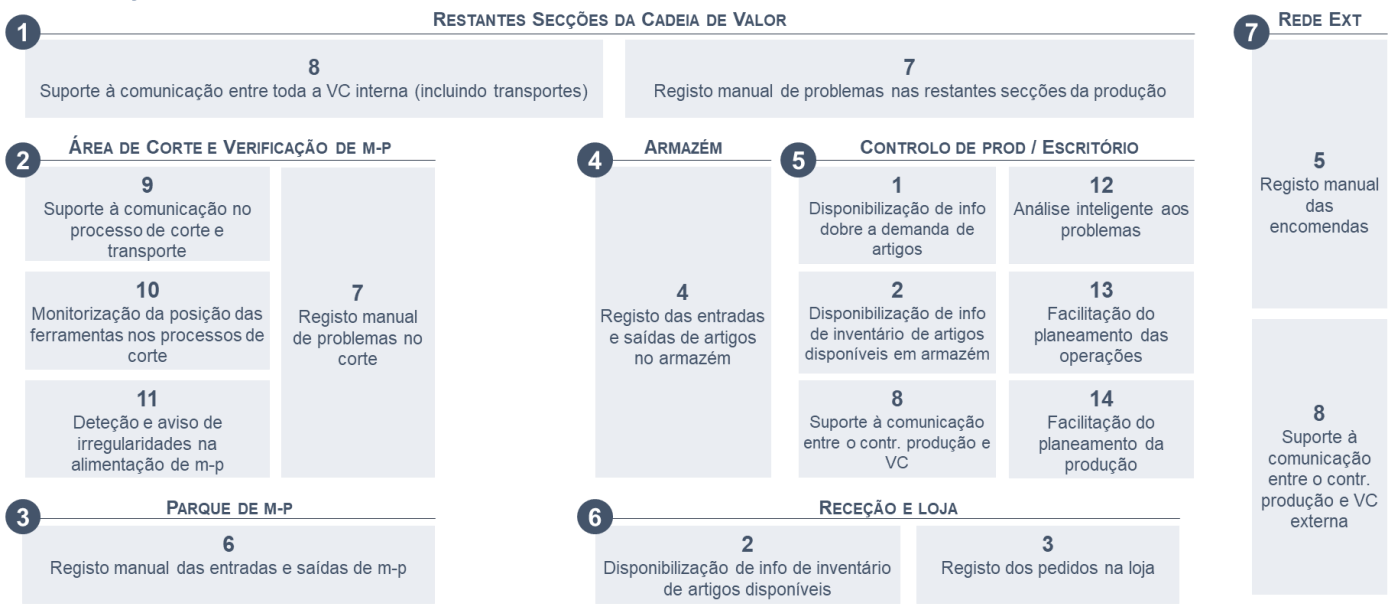


Figura E – 1. Layout de organização de recursos pelas respetivas secções (E10 – P1).

Tabela E – 4. Componentes e Funcionalidades do Conceito A (E10).

S	8C	COMPONENTES E FUNCIONALIDADES A PROJETAR	→	CONCEITO A
RECEÇÃO E LOJA	I	✓ Dados a recolher neste bloco: dados obtidos por registo manual (pontos seguintes)	✓	Dispositivos que permitem a aquisição e armazenamento de dados localmente e/ou no portal de IS
		✓ Dispositivos que permite o registo de dados, através de uma interface intuitiva	✓	Dispositivos com interfaces HC-CC que permitem os tópicos de Cognição (IV), de forma ergonómica e intuitiva
		✓ Dados a registar (pedidos de encomenda): artigos std, artigos pers, qtds, morada de entrega, contacto cliente	✓	Dispositivos móveis de comunicação telefónica e digital
		✓ Dispositivos conectados ao centro de informação (IS)	✓	Dados essenciais para permitir o tópico (1) de Cognição (IV): quants., perfis, comprimentos, local armazen.
RECEÇÃO E LOJA	II	✓ Dispositivos que permitem a transferência e centralização de dados imediatos no IS	✓	Dados úteis para permitir o tópico (1) de Cognição (IV): artigos em fase terminal, tempo
		✓ Conversão de dados em informação através de algoritmos simples (Software MES)	✓	Informação a receber: inventário disponível em armazém (Software MES)
		✓ Informação a criar: demanda.	✓	
		✓ Centro de informação (IS)	✓	Plataforma virtual de acesso à Cognição (IV)
RECEÇÃO E LOJA	III	✓ Historial de informação em constante atualização	✓	
		✓ Conhecimento de informação de inventário de artigos prontos para venda em armazém (1)	✓	Estruturação e organização de dados em menus e pastas de fácil acesso
		✓ Acesso a funcionalidades do Software MES	✓	Utilização de algoritmo que proporcione funções de inteligência aplicadas automaticamente
			✓	
ARMAZÉM	I	✓ Dispositivos de leitura de código de barras que permite o registo de entradas de artigos em armazém	✓	Dispositivos que permitem a transferência e centralização de dados imediatos no IS
		✓ Dispositivos com interfaces intuitivas que permitam os níveis III e IV	✓	Dispositivos móveis de comunicação telefónica e digital
		✓ Dispositivos conectados ao centro de informação (IS)	✓	Dados a registar: referência do artigo, quantidades, localização de armazenamento
		✓ Transformação de informação através do Software MES (Funcionalidades de WMS)	✓	
ARMAZÉM	II	✓ Historial de informação em constante atualização	✓	Plataforma virtual
		✓ Verificação da validade e gestão dos dados registados (Funcionalidade de Software WMS)	✓	
			✓	
			✓	
CONTROLO DE PRODUÇÃO	I	✓ Dispositivos que permita o acesso a Cognição (IV) no escritório e nos postos de controlo centralizado	✓	Dispositivos que permitem a transferência e centralização de dados imediatos no IS
		✓ Dispositivos móveis de comunicação telefónica e digital	✓	Dispositivos que permitem a aquisição e armazenamento de dados localmente e/ou no portal de IS
		✓ Dispositivos que permitem a gestão de dados, através de uma interface intuitiva	✓	
	II	✓ Utilização de algoritmos avançados	✓	Transformação de dados provenientes do registo de encomendas em loja (Software MES)
		✓ Transformação de dados provenientes do registo do armazém (Software WMS)	✓	Transformação de dados provenientes do registo de ocorrências na produção (Software MES)
	III	✓ Rede de dispositivos	✓	Historial de informação em constante atualização
		✓ Centro de informação (IS)	✓	Plataforma virtual
IV	✓ Conhecimento dos problemas da produção	✓	Funcionalidades de análise de problemas (PHM – Gestão de Prognósticos e Robustez)	
	✓ Conhecimento do inventário disponível em armazém	✓	Funcionalidades de WMS (Sistema de gestão de armazém)	
	✓ Conhecimento da demanda de produtos	✓	Funcionalidades ERP, que inclua modelos automáticos de conhecimento das operações necessárias e planeamento faseado das mesmas	
VI	✓ Monitorização dos registos de problemas	✓	Estruturação e organização otimizadas de informação	
	✓ MES que inclua: ✓ Funcionalidades de PIMS (Sistema de Gestão de Info de Produção), como modelos automáticos de cálculo dos parâmetros de produção e soluções otimizadas de procedimentos de fabrico	✓	Apresentação da informação com tratamento visual automático (Dashboards e outras ferramentas visuais)	
VII	✓ Nos softwares mencionados em (IV) inclusão de: ✓ Ferramentas que auxiliem a reação inteligente a alterações.	✓	Ferramentas que auxiliem a reconstrução dinâmica de cadeias de fornecedores	
	✓ Acesso e controlo de acessos à informação das diferentes secções da VC	✓		
PARQUE M-P	I	✓ Dados a registar manualmente: quantidade de troncos que entram e saem do parque, respetivo tipo de madeira, comprimento e diâmetros máximos e mínimos de cada tronco, ocorrências de problemas	✓	Dispositivos que permitem a transferência e centralização de dados imediatos no IS
		✓ Dispositivos que permitem o registo de dados, através de uma interface intuitiva	✓	Dispositivos que permitem a aquisição e armazenamento de dados localmente e/ou no portal de IS
			✓	Dispositivos que permitem modificar e validar os registos
	II	✓ Dispositivos com interfaces intuitivas que permitam os níveis III e IV	✓	
II	✓ Transformação de dados em informação através do MES	✓		
	✓ Historial de informação em constante atualização	✓		
III	✓ Plataforma virtual	✓		
	✓ Verificação da validade e gestão dos dados registados (Funcionalidade de Software WMS)	✓		

S	8C	COMPONENTES E FUNCIONALIDADES A PROJETAR		→	CONCEITO A
ÁREA DE CORTE	I	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Dados a recolher neste bloco: dados obtidos pelos sensores, dados obtidos por registo manual (pontos seguintes).</li> <li>✓ Sensores de deteção de irregularidades na alimentação de m-p na entrada de cada subprocesso de corte</li> <li>✓ Sensores de monitorização da posição das ferramentas das máquinas M1, M2, M3, M4 (ver página M do Anexo D).</li> <li>✓ Dispositivo que permite o registo de dados relativos a problemas e ocorrências no corte, através de uma interface intuitiva</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Dispositivo que permite o acesso ao portal central de partilha de informações</li> <li>✓ Dispositivos acessíveis em todas as máquinas</li> <li>✓ Dispositivos que possibilitam as funcionalidades de Cognição (IV)</li> <li>✓ Dispositivos de comunicação telefónica e digital</li> </ul>	
	II	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Informação necessária neste bloco: parâmetros de produção, horários, planos, prioridade de satisfação de pedidos, posição das ferramentas</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Transformação de dados provenientes dos sensores (Software MES)</li> </ul>	
	III	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Rede de dispositivos</li> <li>✓ Centro de informação (IS)</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Historial de informação em constante atualização</li> <li>✓ Plataforma virtual</li> </ul>	
	IV	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Lançamento de alertas quando ocorrem as irregularidades</li> <li>✓ Consulta de instruções de planeamento, produção, operações</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Monitorização da posição das ferramentas para posterior controlo manual (incluído no MES)</li> </ul>	
REstantes SeCções	I	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Dados a registar manualmente neste bloco: ocorrências e <i>bottlenecks</i></li> <li>✓ Dispositivos que permitem o registo de dados, através de uma interface intuitiva</li> <li>✓ Dispositivos que permitem a transferência e centralização de dados imediatos no IS</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Dispositivos que permitem a aquisição e armazenamento de dados localmente e/ou no portal de IS</li> <li>✓ Dispositivos com interfaces intuitivas que permitam os níveis III e IV</li> <li>✓ Dispositivos que possibilitem a comunicação digital e telefónica</li> </ul>	
	II	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Transformação de dados em informação através do MES</li> </ul>			
	III	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Historial de informação em constante atualização</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Plataforma virtual</li> </ul>	
	IV	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Verificação da validade e gestão dos dados registados (Funcionalidade de Software MES)</li> </ul>			
REDE EXTERIOR	I	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Dados que os clientes registam através do portal de encomendas: artigos standard escolhidos, quantidades, detalhe dos produtos personalizados (perfil, comprimento)</li> <li>✓ Dispositivos pessoais dos clientes com acesso à internet (para registo de pedidos de encomenda)</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Dispositivos que possibilitem o acesso ao centro de informação</li> <li>✓ Dispositivos que possibilitem a comunicação digital e telefónica entre todos os colaboradores das secções e responsáveis pelo transporte.</li> </ul>	
	II	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Transformação de dados em informação (MES)</li> </ul>			
	III	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Rede de dispositivos (internos e externos)</li> <li>✓ Centro de informação (IS)</li> </ul>			
	IV	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ MES que inclua: <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Acesso ao portal de informação, por parte todos os colaboradores que possuam um dispositivo</li> <li>✓ Receção da informação proveniente da aplicação na internet para realização de encomendas</li> <li>✓ Funcionalidades de Gestão de Relacionamento com clientes (CRM), para gerir encomendas e problemas associados</li> </ul> </li> </ul>			
VIII	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Participação dos clientes no processo de design através de uma aplicação na internet intuitiva, que facilite a submissão de pedidos de encomenda</li> </ul>				

A realização da Tabela E – 4 foi acompanhada de uma consulta constante da Figura E – 1, Tabela E – 1 e Tabela E – 2, a fim de não se perder informação, ou de confirmar que não se inclui informação de necessidades que não são imprescindíveis.

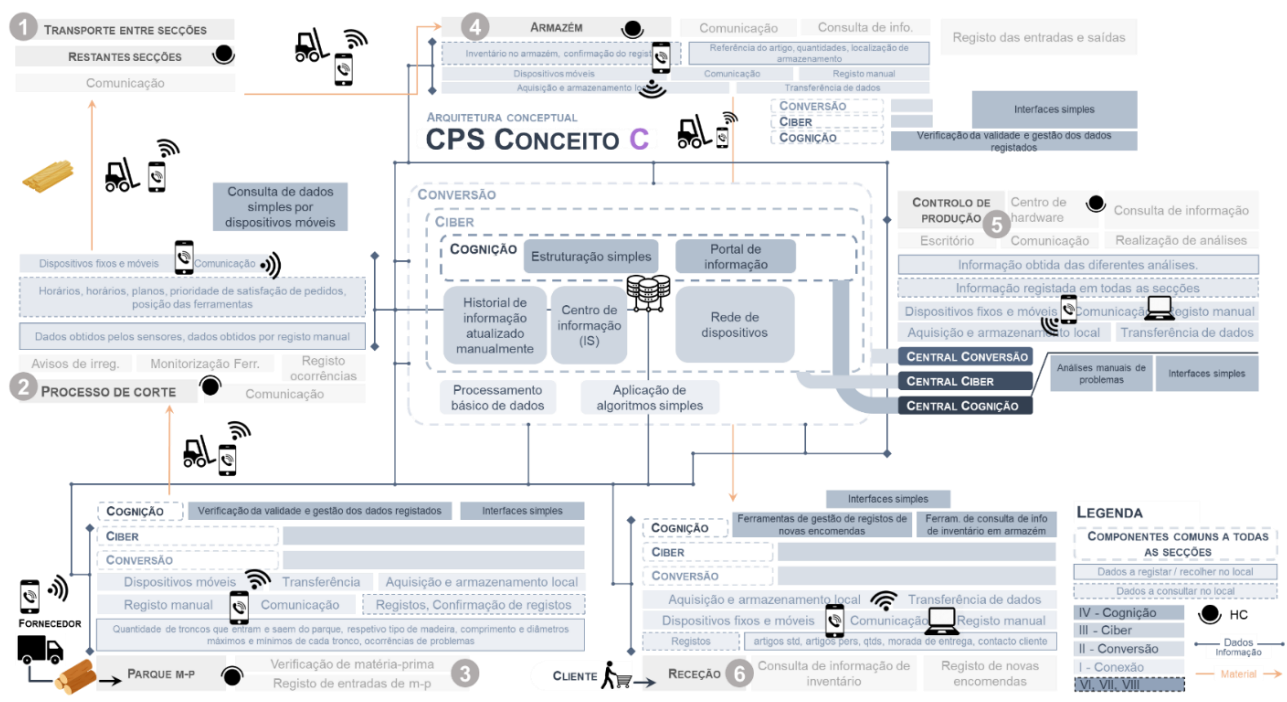


Figura E – 2. Arquitetura de CPS do Conceito C (E5 e E10).